

**Національний технічний університет України
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені Ігоря Сікорського»**

МЕХАНІКО-МАШИНОБУДІВНИЙ ІНСТИТУТ

Кафедра технології машинобудування
(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»
УДК 621.914.22

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

(підпис) Ю.В.Петраков
(ініціали, прізвище)

“ ” _____ 2019 р.

**Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістра**

зі спеціальності **131. Прикладна механіка. Технології машинобудування**
(код і назва спеціальності)

на тему: “Підвищення стійкості кінцевих фрез для оброблення
композиційних матеріалів”

Виконав (-ла): студент (-ка) 2 курсу, групи **МТ-381мп**
(шифр групи)

Філімонов Євген Володимирович
(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Науковий керівник доцент, к.т.н., доцент Лапковський С.В.
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Консультант

(назва розділу)

(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

(підпис)

Рецензент доцент, к.т.н., доцент Литвин О.В.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2019 року

Реферат

Філімонов Є. В. Підвищення стійкості кінцевих фрез для оброблення композиційних матеріалів: магістерська дис.: 131. Прикладна механіка. Технології машинобудування/ Філімонов Євген Володимирович. – Київ, 2019. – 120 с.

Магістерська дисертація містить 120 сторінок, 86 рисунка, 40 таблиць, 25 літературних джерел.

Актуальність теми: до теперішнього часу методологічний аспект вирішення задачі вибору режимів різання під час фрезерування композитних матеріалів кінцевими фрезами ще недостатньо відпрацьований.

Метою та задачами дослідження є підвищення стійкості кінцевих фрез під час фрезерування композитних матеріалів та підвищення якості обробленої поверхні.

Об'єктом дослідження є процес фрезерування композитних матеріалів кінцевими фрезами.

Предметом дослідження є стійкість кінцевих фрез та якість (шорсткість) обробленої поверхні склопластикового композиту.

Наукова новизна одержаних результатів:

- отримані емпіричні рівняння, що пов'язують початкові параметри процесу фрезерування композиту із зношуванням фрези по задній поверхні, температурою в зоні різання та шорсткістю обробленої поверхні;

- отримані зручні наочні графіки залежності вихідних параметрів процесу фрезерування композиту від початкових параметрів.

За темою магістерської дисертації було опубліковано дві наукові публікації, обидві за кордоном.

Композитний матеріал, склопластик, склотекстоліт, кінцева фреза, модель, емпіричне рівняння, метод скінченних елементів, стійкість інструменту.

Abstract

The master's thesis contains 120 pages, 86 figures, 40 tables, 25 literary sources.

The relevance of the topic: to date, the methodological aspect of solving the problem of the choice of cutting modes during milling of composite materials with end mills is still not sufficiently worked out.

The aim and objectives of the study are to increase the stability of end mills during milling of composite materials and to improve the quality of the machined surface.

The object of the study is the process of milling composite materials with end mills.

The subject of the study is the stability of the end mills and the quality (roughness) of the treated surface of the fiberglass composite.

Scientific novelty of the obtained results:

- obtained empirical equations that relate the initial parameters of the milling process of the composite with the wear of the milling cutter on the back surface, the temperature in the cutting area and the roughness of the machined surface;
- obtained convenient visual plots of the initial parameters of the milling process of the composite milling process from the initial parameters.

Two scientific publications, both abroad, were published on the topic of the master's thesis.

Composite material, fiberglass, fiberglass, end mill, model, empirical equation, finite element method, tool stability.

Зміст

<i>Вступ.....</i>	<i>6</i>
<i>1 Аналіз сучасних досліджень і стану із забезпеченням стійкості інструменту під час обробки композитів.....</i>	<i>8</i>
<i>1.1 Загальний опис композитних матеріалів.....</i>	<i>8</i>
<i>1.2 Типові методи отримання склопластиків.....</i>	<i>19</i>
<i>1.3 Характеристики склопластиків, їх властивості і структура.....</i>	<i>24</i>
<i>1.4 Деякі особливості обробки деталей зі склопластиків ріжучим інструментом.....</i>	<i>34</i>
<i>1.5 Конструкції фрез для обробки склопластику.....</i>	<i>37</i>
<i>1.6 Огляд САПР для моделювання процесу фрезерування.....</i>	<i>40</i>
<i>1.7 Критерій стійкості інструменту.....</i>	<i>43</i>
<i>1.8 Мета і завдання дослідження.....</i>	<i>44</i>
<i>2 Метод дослідження.....</i>	<i>46</i>
<i>2.1 Планування дослідження.....</i>	<i>46</i>
<i>2.2 Матеріал для проведення дослідження.....</i>	<i>47</i>
<i>2.3 Обладнання для роботи.....</i>	<i>52</i>
<i>2.3.1 Фрезерні верстати.....</i>	<i>52</i>
<i>2.3.2 Обладнання для проведення вимірювань.....</i>	<i>55</i>
<i>2.3.3 Фрези.....</i>	<i>59</i>
<i>2.4 Методика подальшої обробки отриманих під час проведення експериментів даних.....</i>	<i>64</i>
<i>2.5 Висновки до розділу.....</i>	<i>68</i>
<i>3 Дослідження процесу фрезерування склопластику із метою виявлення зв'язку між режимами різання та параметрами обробленої поверхні.....</i>	<i>69</i>
<i>3.1 Виявлення впливу режимів різання під час фрезерування склопластику на зношування по задній поверхні фрези.....</i>	<i>69</i>
<i>3.2 Виявлення впливу режимів різання під час фрезерування склопластику на шорсткість обробленої поверхні.....</i>	<i>74</i>
<i>3.3 Виявлення впливу режимів різання під час фрезерування склопластику на температуру в зоні різання.....</i>	<i>81</i>
<i>3.4 Висновки до розділу.....</i>	<i>89</i>

<i>4 Математичне моделювання процесу фрезерування склопластику методом FEA.....</i>	<i>90</i>
4.1 Побудова моделі.....	90
4.2 Аналіз результатів.....	94
4.3 Висновки до розділу.....	99
<i>5 Приклад використання результатів дослідження на практиці.....</i>	<i>100</i>
5.1 Вихідні дані для вибору фрез і призначення режимів різання.....	100
5.2 Алгоритм призначення режимів різання.....	100
5.3 Приклад реалізації алгоритму.....	101
5.4 Висновки до розділу.....	103
<i>6. Розробка стартап-проекту.....</i>	<i>104</i>
6.1 Опис ідеї проекту.....	104
6.2 Технологічний аудит ідеї проекту.....	106
6.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.....	107
6.4 Розроблення ринкової стратегії проекту.....	113
6.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту.....	115
6.6 Висновки до розділу.....	117
<i>Висновки.....</i>	<i>118</i>
<i>Перелік посилань.....</i>	<i>119</i>
<i>Додатки</i>	

Вступ

В сучасному світі набули широкого розповсюдження так звані композитні матеріали, зокрема вуглепластики, склопластики тощо. Вони застосовуються майже у всіх галузях промисловості, а перспективи їхнього подальшого розповсюдження величезні. І все це через їхні вражаючі властивості: вони міцні, жорсткі, тріщиностійкі, легкі та мають інші привабливі фізико-механічні властивості що надають дуже високі експлуатаційні характеристики готовим виробам, виготовленим із застосуванням композиційних матеріалів.

В цій роботі буде приділено увагу групі композитних матеріалів відомих як склопластики. Однак передбачається що методика, що розглядається може бути легко застосована до інших типів композитів.

Номенклатура виробів із композитних матеріалів, зокрема виробів зі склопластикових композитів дуже різноманітна. Сьогодні із таких матеріалів виготовляються і доволі прості речі, такі як труби водопостачання, так і такі складні і відповідальні речі, як елементи конструкції пасажирських літаків, лопаті гелікоптерів і вітрогенераторів тощо.

Виготовлення виробів зі склопластику (як майже і з будь-якого іншого композиційного матеріалу) з точки зору технологічності не є аж занадто трудомістким процесом. Однак, треба зазначити що механічна обробка, як то такі розповсюджені операції як точіння та фрезерування, пов'язана з деякими особливостями, які потрібно мати на увазі при складанні технологічного процесу механічної обробки виробу зі склопластику задля отримання необхідної якості готових виробів, а також для підвищення продуктивності процесу обробки. В цій роботі нас цікавитиме саме фрезерна обробка виробів зі склопластиків кінцевими фрезами.

Найбільш за все ускладнює процес фрезерування склопластикових композитів інтенсивне зношування ріжучих кромek фрези. Перш за все, вищезазначене явище інтенсивного зносу інструменту, що через пружні властивості оброблюваного матеріалу відбувається переважно по задній поверхні леза, відбувається внаслідок присутності твердого наповнювача (скловолокно у випадку склопластиків) в матриці, що призводить до потужного абразивного ефекту в зоні різання.

Крім того, в більшості випадків композитних матеріалів, а зокрема і склопластиків, що розглядаються в даній роботі, через високі теплоізоляційні властивості таких матеріалів тепло, що виділяється під час обробки, із зони різання відводиться переважно саме в інструмент, а не в стружку чи то заготовку, що так само негативно впливає як на стійкість фрези так і на якість обробленої поверхні.

Переважно виробники для фрезерування різноманітних композитів, зокрема і склопластиків використовують твердосплавні кінцеві фрези. Набагато рідше застосовують фрези спеціальних конструкцій. Такі фрези завжди є аж надто дорогими. В будь якому випадку майже весь цей інструмент виготовляється виробниками без проведення випробувань на різних типах композитів і, відповідно, без надання інформації покупцеві щодо застосування цих фрез при обробці різних марок композиційних матеріалів, яких вже сьогодні існує безліч і їх кількість з кожним днем зростає вражаючими темпами.

Через це існує проблема щодо призначення режимів різання, обрання геометричних параметрів конструкції фрези, її матеріалу тощо які будуть задовольняти економічно-обґрунтованому процесу фрезерування із отриманням виробу необхідної якості для конкретної марки композиційного матеріалу.

Отже, ми дійшли висновку, що пошук експериментальної залежності між технологічними параметрами процесу механічної (фрезерування) обробки (подача S , швидкість різання v , глибина різання t), конструкцією фрези (матеріал, кути в плані, тощо) та конструкторськими вимогами (шорсткість поверхні) щодо готового виробу є актуальною задачею, що потребує вирішення.

Методика, що розглядатиметься далі дозволить проводити виявлення аналогічних емпіричних залежностей для будь-якого іншого типу композиційних матеріалів.

Результат, який ми очікуємо отримати в даній роботі – підвищення стійкості інструменту (кінцевих фрез) під час процесу фрезерування із дотриманням рекомендацій, розроблених в цій роботі, при дотриманні заданих властивостей готового виробу. Завдяки збільшенню стійкості фрез буде отримано підвищення продуктивності процесу фрезерування, що і є кінцевою метою даного дослідження.

1 Аналіз сучасних досліджень і стану із забезпеченням стійкості інструменту під час обробки композитів

1.1 Загальний опис композитних матеріалів

Композитний матеріал (КМ), або композит — гетерофазний матеріал, окремі фази якого виконують специфічні функції, забезпечуючи йому властивості, яких не має жодний з компонентів окремо. Зазвичай отримують поєднанням двох або більше компонентів, які нерозчинні або малорозчинні один в одному і мають властивості, що сильно відрізняються. Один компонент пластичний (зв'язувальна речовина, або матриця), а другий має високі характеристики міцності (наповнювач, або зміцнювач). Таким чином, у КМ кожний компонент грає свою специфічну роль: матриця забезпечує пластичність, зміцнювач — міцність матеріалу; Особливий клас КМ — це природні КМ [1].

Композити — матеріали які складаються з багатьох компонентів що не розчинені один в одному, тобто які не є сплавами. Типовий композитний матеріал складається із: досить пластичної речовини, що зветься матрицею, і завданням якої є зв'язати компоненти матеріалу так, щоб вони працювали як одне ціле; і з речовини наповнювача, або зміцнювальної, або армуючої речовини, завдання якої надати матеріалу міцності. Вдале поєднання різнотипних матеріалів може призвести до появи композиту із властивостями, що значно відрізняються від характеристик його складових. Існують також композитні матеріали із більшою кількістю компонентів у складі, аніж два.

Властивості композитних матеріалів залежать від матеріалу матриці і зміцнювача, кількісного їх співвідношення, форми зміцнювача, для волокнистих КМ — від схеми армування і довжини волокон.

Матриця зв'язує композицію, надає їй форму. Від властивостей матриці залежать технологічні режими одержання композиту і такі важливі характеристики, як робоча температура, густина, питома міцність.

Можливим є отримання дуже широкого спектру композитних матеріалів із найрізноманітнішим набором необхідних властивостей шляхом заміни матриці і наповнювача, зміни орієнтації наповнювача, співвідношення цих речовин тощо. Вже існують композити, що перевершують традиційні матеріали і сплави за своїми механічними властивостями і в той же час ці композити мають меншу густину, що робить їх використання дуже перспективним.

Використання композитів зазвичай дозволяє зменшити масу конструкції при збереженні або поліпшенні її механічних характеристик.

Дуже привабливою є можливість отримання матеріалів із високими значеннями в'язкості, тобто матеріалів, стійких до розвитку тріщин. Найцікавішим є те, що композити з високою в'язкістю можна отримувати навіть коли всі вихідні матеріали є крихкими, тобто не виявляють тріщино-стійких властивостей – не є в'язкими. Наприклад і скло, і епоксидна смола є крихкими матеріалами, але отриманий із них склопластик може мати високі значення в'язкості [2].

Композитні матеріали класифікують за рядом ознак:

- за формою зміцнювального компонента. Треба зазначити, що волокна можуть бути безперервними і дискретними;
- за видом зміцнювальної речовини (наповнювача);
- за видом матеріалу матриці;
- за схемою армування.

Отже, за формою зміцнювального компонента, або за своєю структурою композитні матеріалу зазвичай поділяють на такі класи як: зміцнені частками, шаруваті, дисперсно-зміцнені, волокнисті та нанокомпозити.

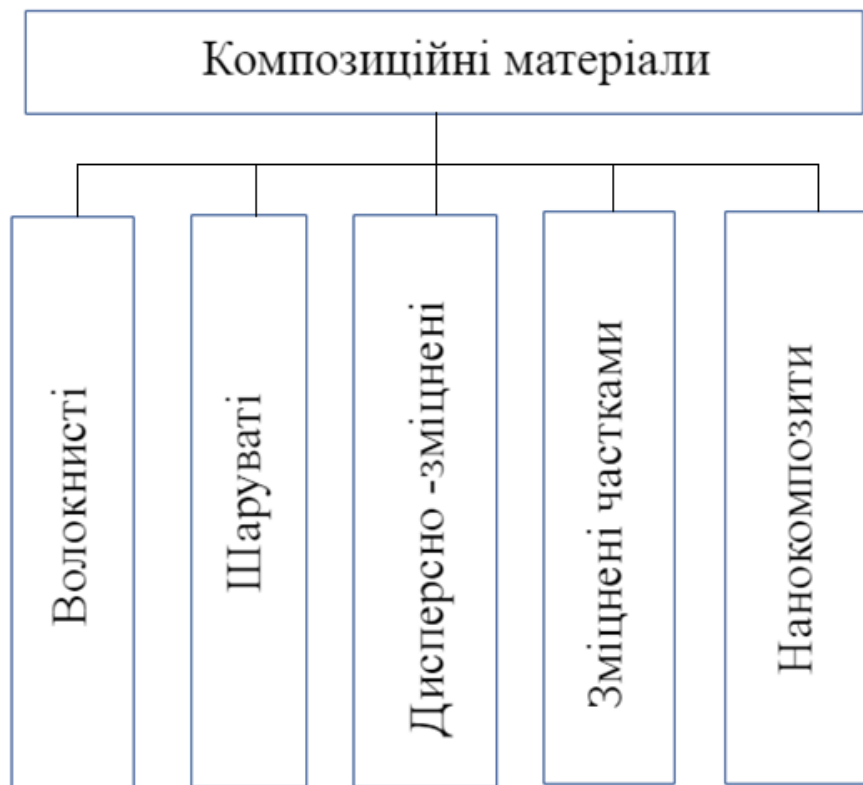


Рисунок 1.1 - Класифікація композитів за формою зміцнювального компонента

Найпоширеніші з них – волокнисті композитні матеріали. Волокнисті композити – це композити що армовані ниткоподібними кристалами або волокнами. До появи нових механічних властивостей у матеріалу призводить

додавання навіть невеликої кількості наповнювача в композитних матеріалів волокнистого типу. Що стосується волокон, то вони можуть бути як дискретними, так і безперервними.

Застосовуються доволі різні типи армуючих волокон. Це і нитки, і тканини, і стрічки, і джгути. Конкретний вибір завжди залежить від властивостей матеріалу, що необхідно отримати, а також від технології введення у матрицю армуючих волокон, що використовується.

Окрім самого типу волокон, що застосовуються, дуже широко варіювати механічні характеристики композиту дозволяють також такі дії як зміна концентрації волокон, їх розміру і орієнтації. Цілком можливим є отримання заданої анізотропії властивостей композитного матеріалу під конкретні потреби. Так, наприклад, можна додаванням у потрібних напрямках волокон провідників отримати матеріал провідник повздовж заданої осі, що в той же час є діелектриком у всіх інших напрямках.

Для більшості інших класів композитних матеріалів характерним є те, що матриця є армованою часточками речовини наповнювача. Розрізняються вони розмірами часток, їх складом і концентрацією. По класифікації їх перш за все розрізняють саме за розміром частинок. Так, наприклад, у композитах зміцнених частками, розмір часток не має перевищувати 1 мкм, а вміст зазвичай становить 20-25% (за обсягом). В той же час дисперсно-зміцнені композити повинні містити від 1 до 15% (за обсягом) часток розміром від 0,01 до 0,1 мкм. У нанокомпозитів – відносно нового класу композитних матеріалів, розміри часток у їхньому складі вимірюється вже в нанометрах і варіюється в межах 1-10 нм.

Композитні матеріали з металевою матрицею.

В композитних матеріалів створених на основі металів в якості матриці застосовують алюміній, магній, нікель, мідь і т. ін. В якості зміцнювальної речовини зазвичай використовують або високоміцні волокна, або тугоплавкі частинки різної дисперсності, що не розчиняються в основному металі [3].

Механізм зміцнення таких композитів волокнами і дисперсними частинками має принципові відмінності. У дисперсно-зміцнених композитних матеріалів міцність залежить від здібності дисперсних частинок гальмувати рух дислокацій у матеріалі матриці. В таких матеріалах саме матриця є навантаженим елементом. Відстань між частками та їх розміри значним чином впливають на міцність таких композитів. Дисперсно-зміцнені композити поділяють на два основні типи, в залежності від розмірів часток. Перший тип – матеріали з частинками 10-100 нм із питомою долею до 15%. Другий тип – композитні матеріали з частинками, які перевищують за розмірами 1 мкм, із питомим об'ємом понад 25%.

В матеріалах, що відносяться до першого типу матриця несе майже все навантаження, тоді як завданням часток є ускладнювати переміщення дислокацій і тим самим опосередковано сприяти зміцненню. В таких

композитів коефіцієнт зміцнення, визначений як відношення тимчасового опору композиту до тимчасового опору матриці $\sigma_{\text{КОМП}} / \sigma_{\text{МАТР}}$, може сягати значення 15. На відміну від них, у композитах другого типу навантаження розподіляється більш рівномірно між матрицею й дисперсними частками зміцнювального матеріалу. Окрім того, зміцнювальні частинки, як і випадку композитів першого типу, перешкоджають руху дислокацій. Значення коефіцієнту зміцнення $\sigma_{\text{КОМП}} / \sigma_{\text{МАТР}}$ у таких композитів може сягає значення 25.

В якості прикладу композитних матеріалів першого типу можна навести алюміній, зміцнений високодисперсними частинками Al_2O_3 . Такий матеріал зберігає міцність до високих температур (приблизно до позначки у 80% від температури плавлення) і є стійким до явища повзучості. Зазвичай такі композитні матеріали отримують методами порошкової металургії. Вони мають застосування в якості жароміцних і жаростійких матеріалів.

Твердосплавні композитні матеріали, такі як WC-Co, TiC-Co та ін., що використовуються в основному в якості ріжучого інструменту, для виготовлення лопаток турбін, матриць та пуансонів – відносяться до другої групи дисперсно-зміцнених композитів.

На відміну від дисперно-зміцнених композитів, у композитних матеріалів армованих волокнами, матриця лише передає навантаження волокнам і рівномірно розподіляє його між ними. В таких матеріалах при незмінному співвідношенні матриці і зміцнювальної речовини міцність композиту залежить від міцності матеріалу волокон, якості зчеплення між матрицею і волокнами, а також від опору матеріалу матриці навантаженням зсуву. В якості прикладу можна навести композитний матеріал «Алор», що за структурою є алюмінієвою матрицею армованою органічним волокном. Якщо для алюмінію $\sigma_{\text{В}} \sim 50$ МПа, то в такого композитного матеріалу $\sigma_{\text{В}}$ сягає позначки 500–600 МПа, а такий важливий показник, як швидкість росту тріщини, у порівнянні із алюмінієм, знижується більш ніж у 20 разів. Волокна на шляху розвитку тріщини є для неї надскладною перепорою.

У волокнистих композитних матеріалів велике значення має відношення довжини волокон до діаметру: більш високі значення цього параметра відповідають більш міцному матеріалу.

Іноді мають застосування комбінації різних видів зміцнювальної речовини. Такі композитні матеріали називають гібридними. Завдяки можливості поєднувати сильні сторони одразу декількох матеріалів такі композити, зазвичай, мають кращі технологічні та службові характеристики.

Питома частка зміцнювальної речовини у волокнистих композитних матеріалах може мінятися від декількох відсотків до 70 — 80%, а коефіцієнт зміцнення сягає позначки 50.

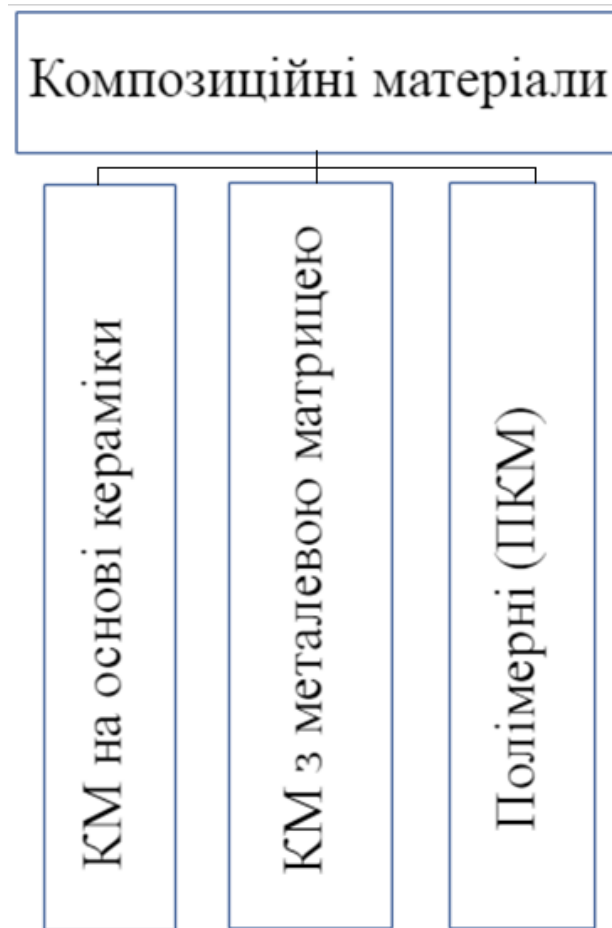


Рисунок 1.2 - Класифікація композитних матеріалів

Шаруваті композитні матеріали – композити, в яких пошарово застосовуються різні матеріали, із різними характеристиками. Показовим прикладом покращення характеристик таких матеріалів по відношенню до складових є зміцнення вуглецевих сталей нікелевим прошарком.

Типова високоміцна середньо вуглецева сталь після операцій гартування і низького відпуску має $\sigma_B \sim 2000$ МПа, $K_{IC} \sim 44-54$ МПа·м^{1/2} при $KCU \sim 18$ Дж/см². Якщо тепер листи такої сталі поєднати між собою прошарком пластичного нікелю, то отриманий композитний матеріал не руйнується при роботі удару 166 Дж. Дослідження показали, що тріщина гальмується вже біля першим (із боку надрізу) шаром нікелевого матеріалу. Ще одним прикладом значного росту значення в'язкості руйнування є шаруватий композитний матеріал, отриманий поєднанням аустенітної сталі 10X18НЮТ і м'якої низьковуглецевої сталі Ст2кп.

Композиційні матеріали на основі кераміки.

Існують, крім того, високоміцні композитні матеріали також і на основі кераміки. Армування проводять металевими та керамічними дисперсними частками. Керамічні матеріали армовані металевими дисперсними частинками

мають назву КЕРМЕТи. Це матеріали з підвищеним опором щодо теплових навантажень, з підвищеними стійкістю до зношування та теплопровідністю. Високотемпературні кермети використовуються для виготовлення таких характерних виробів як деталі для реактивної, ракетної техніки, арматуру електропечей, деталі для газових турбін тощо. Тверді зносостійкі кермети мають поширення при виготовленні ріжучого інструмента і деталей з підвищеним опором тертя, наприклад фрикційні матеріали для гальмівних пристроїв, шарики підшипників тощо. Існує попит на застосування керметів і в дуже вузькоспеціалізованих областях техніки як, наприклад, тепловиділяючі збірки елементів атомних реакторів.

Існують і волокнисті керамічні композити, проте асортимент придатних для армування кераміки волокон обмежується властивостями самої кераміки.

Технології отримання керамічних композиційних матеріалів це переважно або метод шлікерного лиття – коли волоконний наповнювач заливається суспензією матеріалу матриці, що після сушіння додатково спікається, або методами гарячого пресування – таблетуванням і, також, з подальшим спіканням під тиском.

Полімерні композитні матеріали (ПКМ) - це композити, в яких матрицею служить полімерний матеріал, і вони є одним з найбільш численних і різноманітних видів матеріалів. Їх застосування в різних областях дає значний економічний ефект.

Полімерні матриці (епоксидна, фенолоформальдегідна, поліамідна) в основному служать для зв'язування армуючої речовини і придання виробу потрібної форми. Зміцнювальними матеріалами є у цьому випадку волокна (скляні, вуглецеві, борні, органічні), вуса карбідів, нітридів, боридів, оксидів, а також металевий дріт. Армувальні матеріали можуть бути у вигляді окремих волокон або ниток, джгутів, стрічок, багат шарових тканин. Вміст зміцнювальної речовини становить 60-80% при використанні безперервних волокон і 20-30% для дискретних волокон і вусів.

Композитні матеріали з полімерною матрицею, зокрема, матеріали, армовані скляним волокном (склопластики), можуть з успіхом замінити сталь при виготовленні кузовів автомобілів. Лист із такого КМ розміром $1,8 \times 3$ м важить всього 2,4 кг. Це приводить до зниження маси автомобіля на 500–1000 кг, що дозволяє загалом заощадити близько 1 млн т металу і значно зменшити витрати палива.

Група полімерних композитних матеріалів є дуже поширеною і розвиненою. Основні представники цієї групи композитів це: боропластики, органопластики, склопластики, вуглепластики, полімери наповнені порошком, текстоліти [4].

Із назви склопластику зрозуміло, що це полімерний композитний матеріал, армований скляними волокнами або частинками. В якості в'язуючої речовини використовують переважно термоактивні синтетичні смоли, такі як

фенольні, епоксидні, поліефірні, поліамідні, фуранові смоли та ін.; також використовують термопласти, наприклад поліпропілен, поліаміди, полістирол, полікарбонати, поліетилен тощо. Мають застосування в якості матриці і такі полімери, як також еластomers, неорганічні полімери.

Ці матеріали будучи прозорими для радіохвиль, що важливо, наприклад в авіа- та ракето-будуванні, ще й мають відносно високі міцність та електроізоляційні характеристики, дуже низьку теплопровідність. В якості армуючої речовини використовують джгути (ровінги), тканини, монопіти, комплексні ниті, стрічки, короткі волокна (рис. 1.4).

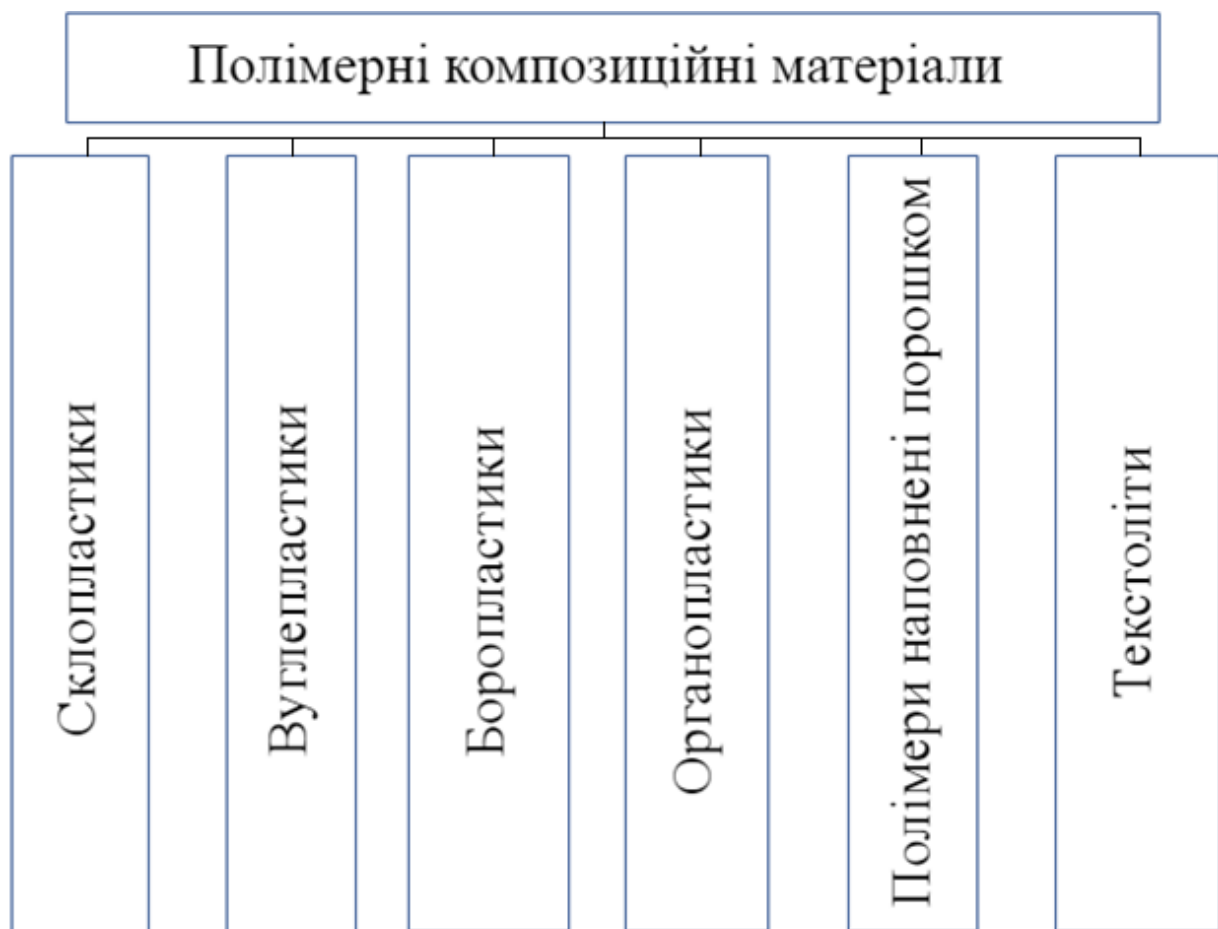


Рисунок 1.3- Класифікація композитних матеріалів полімерної групи

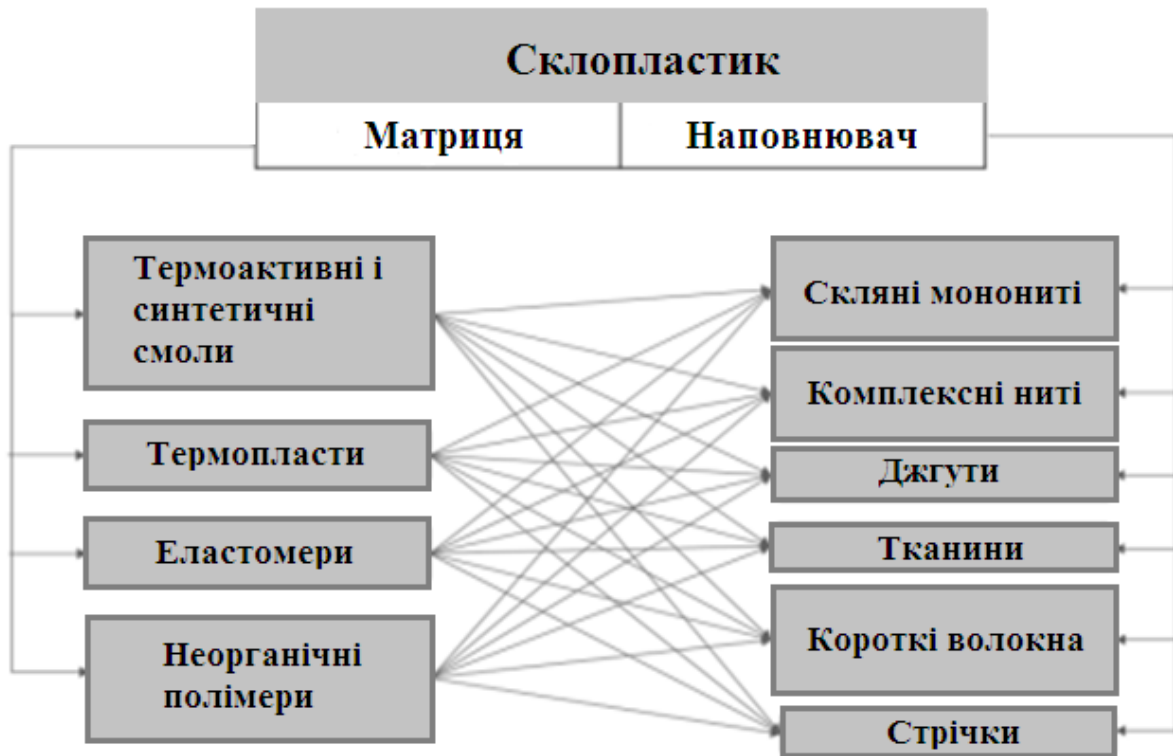


Рисунок 1.4 – Склопластики

Переважно використовуваний на практиці метод отримання склопластиків – пресування скляних волокон змішаних із синтетичними смолами. Наразі у виробництві використовується ціла гамма різних смол. Найпоширеніші із них такі як епоксидні, поліефірні і вінілефірні смоли [5]. Взагалі, використовувані смоли можна розподілити на наступні групи за такими ознаками як хімічний склад, або метод формування, або спосіб застосування тощо:

1. За методом формування:

- для ручного формування;
- для інжекції під вакуумом;
- для методу гарячого пресування;
- для отримання виробів методом намотування;
- для виробництва методом пултрузії.

2. По сферам застосування:

- для отримання конструкційних виробів;
- для виготовлення хімічно стійких виробів;
- для виготовлення вогнестійких виробів;
- для виготовлення теплостійких виробів;

- світлопрозорі смоли.

Приблизний поділ виробів зі склопластикових матеріалів за номенклатурою і по області застосування:

1. Будівництво.

Виготовлення різноманітних профілів конструктивного призначення, таких як: двотаврові профілі, балки, колони тощо.

2. Водопостачання та водовідведення.

Виготовлення труб із тривалим терміном дії, із низьким коефіцієнтом теплопровідності для зменшення тепловтрат та не схильних до проявів корозії, різноманітних дренажних елементів, конструкційних виробів для зміцнення каналів та ін.

3. Інженерні споруди.

Виготовлення спеціальних виробів вузькопрофільного призначення в якості перил, різноманітних настилів для транспортних засобів або пішоходів, виготовлення внутрішніх конструкцій тунелів, виробництво шпунтів, що призначені для зміцнення лінії берега та ін.

4. Електропостачання.

Виготовлення елементів опор ліній електропередачі. Виробництво ізоляторів і коробів для укладання кабелів.



Рисунок 1.5 – Водопровідні труби зі склопластику [6]

5. Застосування у вітроенергетиці.



Рисунок 1.6 - Приклад виготовлення компанією Siemens лопаті вітрогенератора зі склопластику [7]

Вітроенергетика — галузь відновлюваної енергетики, яка спеціалізується на використанні кінетичної енергії вітру. Вітер як джерело енергії є непрямою формою сонячної енергії, і тому належить до відновлюваних джерел енергії. Склопластики є дуже стійкими до корозії та зношування. При відносно

невисокій ціні та експлуатаційних затратах саме це є умовою їхнього широкого застосування у вітроенергетиці. Низька густина додає переваг цим матеріалам, особливо при виготовленні таких деталей вітрогенератору, як лопаті. Завдяки зниженню моменту інерції ротора за рахунок використання склопластиків знижуються вимоги до швидкості вітра, необхідної для запуску ротора. В заселеній місцевості важливою при цьому є радіо-прозорість склопластику, що запобігає створенню перешкод роботі телекомунікаційного обладнання. Для виробництва лопатей несучого гвинта вітрогенераторів використовують, переважно, ненасичені поліефірні або епоксидні смоли в поєднанні зі скловолокном або вуглецевим волокном.

6. Вантажні перевезення.

Зі склопластиків виготовляють легкі, стійкі до корозії вантажні контейнери для морського транспорту.

7. Авіабудування.

Композитні матеріали, включно зі склопластиками використовуються у виробництві радіопрозорих аеродинамічних елементів конструкції, у виробництві елементів оперення, і все більше використовуються у виготовленні навантажених, відповідальних елементів сучасних літаків.

8. Важке машинобудування.

Виробництво різноманітних тяг та штанг, в тому числі для індустрії нафтовидобутку.

9. Спортивний і побутовий інвентар.

Виготовлення прибирального інвентарю, виробництво елементів спортивних знарядь і т. ін.

10. Сільське господарство.

Виробництво огорож, зрошувальних водопровідних систем та ін.

1.2 Типові методи отримання склопластиків

Склопластики на практиці отримують доволі різними методами що наведені в таблиці 1.1

Таблиця 1.1 - Методи формування виробів зі склопластику

Методи формування	
Відкриті	Закриті
1. Ручна викладка 2. Напилення 3. Намотування	1. Просочування під тиском 2. Пресування 3. Лиття під тиском 4. Пултрузія 5. Протягування

Метод ручної викладки.

Цей метод є найпростішим з усіх із точки зору складності обладнання, необхідного для його реалізації. Застосовується цей метод переважно для виготовлення габаритних виробів, таких як кузови автомобілів, корпуси човнів або різноманітні будівельні конструкції.

Цей метод є дуже універсальним що завжди характерно для виробництва з ручною працею. На практиці це означає можливість виготовлення виробів фактично будь-якої складності форми та будь-яких розмірів. При використанні цього методу навантаження на форми є дуже невеликим, єдиний тип навантаження – видалення повітря спеціальним валиком. Через це на виробництві все частіше застосовують форми, виготовлені зі склопластику. За ціною вони до 10 разів дешевші за аналогічні (тобто призначені для виготовлення виробу тієї самої форми і розмірів) форми для, наприклад, гарячого пресування. Відсутність дорогого технологічного обладнання і можливість використання дуже дешевих склопластикових форм, що до того ж є і дуже зносостійкими, є основними факторами що впливають на поширення методу ручної вкладки в дрібносерійному виробництві.

Недоліками цього методу є: надмірні обсяги ручної праці, як наслідок від попереднього – дуже тривалий час на виготовлення виробу; також до недоліків можна віднести великі витрати матеріалів і унеможливлення регулювання вмісту зміцнювальної речовини. Як вище вже було зазначено, цей метод застосовується, переважно, в дрібносерійному виробництві маленькими підприємствами. Попри перелічені недоліки, для таких типів підприємств переваги методу переважають, тому цей метод виробництва є досить поширеним.

Метод напилення.

Цей метод є дуже зручним і привабливим у виготовленні виробів із поліефірних склопластиків, недорогих, із простою конфігурацією. Особливо він підходить для виготовлення різноманітних санітарно-технічних виробів, які в основному є нескладними за конфігурацією, виготовлені з органічного скла, зовнішню поверхню якого покривають ненасиченими поліефірними смолами, з метою зміцнення.

Форми для застосування цього методу, зазвичай виготовлені або зі склопластиків, або з деревини. На середньо- і велико-серійному виробництві можуть застосовувати форми зі склопластиків із металевим облицюванням.



Рисунок 1.7 - Напилення склопластику [8]

Цей метод є дешевшим і продуктивнішим за метод ручної викладки, але існують і недоліки, пов'язані із цим методом. Перш за все цей метод потребує впровадження комплексу спеціальних заходів із безпеки праці через скляний пил і пари полімерів і розчинників. По друге, при застосуванні цього методу надто не просто отримати вироби складної конфігурації.

За своєю суттю цей спосіб отримання склопластикових виробів є досить простим. Просочені смолою рубані скляні волокна через пристрій для розпилювання рівномірно наносяться на форму. Потім суміші дається час на

твердіння. Проте використання методу напilenня вимагає суворого дотримання певних умов.

Якість змішування смоли, вибір згущувача та ініціатору. Ці фази технологічного ланцюга вимагають суворого нагляду. По друге, треба зауважити, що методом напilenня навіть на одному підприємстві, зазвичай отримують великий асортимент виробів, що означає потребу в засобах розпізнавання оснащення, що використовується, а це неминуче призводить до великих витрат.

Метод намотування.

Головне застосування цього методу – виробництво різноманітних тіл обертання, як то водо- газо- провідних труб; різноманітних цистерн для зберігання і транспортування рідин, включаючи хімічно активних, завдяки високій хімічній інертності склопластиків; промислових резервуарів і т. ін.

Існує безліч переваг, що мають вироблені зі склопластиків труби та ємності у порівнянні з тими, що виготовлені з традиційних матеріалів. Метод намотування здатний забезпечити правильно орієнтовану структуру тіл обертання, враховуючи особливості експлуатації і особливостей форми таких предметів. Завдяки використанню в якості зміцнювальної речовини високоміцних скляних волокон у вигляді ровінгів, ниток та стрічок має місце досягнення матеріалом максимальної міцності.

Сам по собі, метод намотування в технологічному плані відноситься до переліку способів виготовлення спеціальних виробів. Застосування цього методу забезпечує дуже широкий діапазон розмірів і конфігурацій отримуваних виробів: від таких велетенських виробів, як корпуси башт вітрогенераторів, або корпусів кораблів і промислових цистерн для заводів, до крихітних виробів у декілька міліметрів в діаметрі і довжина яких не перевищує декількох сантиметрів.

Економічні аспекти. Значною мірою вартість технологічної оснастки а також обладнання залежить як від діаметру виробу, що виготовляється, так і від методу намотування. При виробництві нескладних деталей, як от наприклад труби, безперервний тип намотування даватиме найліпші показники економічної ефективності, що в свою чергу забезпечуватиме високий рівень серійності виробництва. Періодичний режим намотування необхідний при виготовленні деталей зі змінним діаметром. Висока продуктивність процесу в таких випадках досягається використанням сучасних, досить складних верстатів токарного типу.



Рисунок 1.8 – Намотування склопластику

Такі верстати мають числове програмне керування і різні системи контролю траєкторії руху вічка, які забезпечують верстату відносно гарну точність позиціонування ($<0,1$ мм); з метою підвищення продуктивності такі верстати мають досить високу швидкість ходу повздовжнього супорту (≥ 2 м/с).

Закриті способи. Переважно використовуються для отримання препрегів і преміксів на основі термопластів і реактопластів. З отриманих виробів отримують деталі з високою термостійкістю, з високою стійкістю до так званого теплового старіння, з високою твердістю і жорсткістю поверхневого шару. Також отримані вироби є гарними електро-, тепло- і звукоізоляторами.

Просочення під тиском.

Як і метод ручної викладки цей метод застосовується, переважно, в дрібносерійному виробництві. В порівнянні з іншими методами реалізується мінімальне виділення мономеру. Завдяки цьому використовується недороге і дуже просте оснащення, що своєю чергою дозволяє швидко переходити на випуск нової продукції. Неможливість отримати деталі з високоякісною поверхнею, значна усадка готових виробів і низька продуктивність методу є основними недоліками, що стримують впровадження цього методу на середньо- і крупносерійному виробництві, на великих підприємствах.

Просочення під вакуумом за своєю суттю є різновидом технології просочення під тиском. Зовнішній механізм замикання не використовується при цьому методі, оскільки його функцію виконує вакуум. Розріджене повітря в порожнечі форми поліпшує просочення волокна полімером і підвищує якість

виробу за рахунок зменшення включень повітряних бульбашок в структурі композиту. Як матеріал форм зазвичай використовують армовані пластмаси. Зі збільшенням розмірів виробу метод стає ще ефективнішим за рахунок того, що витрати на технологічну оснастку становляться мінімальними у порівнянні з іншими методами.

Метод пресування.

Найбільш застосовуваний на виробництві таких речей, як меблів, басейнів, спортивного інвентарю та ігрових майданчиків метод. Тривалість циклу складає приблизно 4-7 хвилин – більше для габаритніших виробів. Існують два типи пресування склопластику, в залежності від габаритів отримуваних деталей:

1. виготовлення пресуванням висушених, попередньо просочених тканин (препрегів) і преміксів;

2. холодне пресування – тобто пресування безпосередньо в формі, з просоченням.

Лиття під тиском.

Лиття під тиском має цілий ряд переваг у порівнянні із пресуванням. Основні із них це: точність дозування матеріалу матриці і, як наслідок, зниження втрат сировини на виробництві; незначний час циклу; висока якість поверхні виготовленого виробу, що в більшості випадків виключає необхідність в подальшій обробці; підвищена технологічність виробництва за рахунок високого ступеню автоматизації.

Лиття під тиском застосовується для виготовлення препрегів. Зазвичай масова частка скловолокна у препрезі не більша за 20-25%. Для зберігання і транспортування препрегів їх намотують у рулони вагою до 400 кг.

Виходячи із поставленої мети скоротити втрати сировини через відходи як то литники і добавки, на підприємствах, що використовують метод лиття під тиском дуже часто використовують литникові канали, що прогриваються до температури 120-130 °С, так зване безлитникове лиття.

Метод протягування.

Ще однією технологією виготовлення виробів зі склопластику, що заслуговує на опис є технологія безперервного протягування (пултрузії) крізь формоутворюючу фільтру. На спеціальних верстатах (пултрузійних машинах) виготовляють різноманітні профілі. Для прикладу, спрощено процес можна описати за наступною схемою.

Три стадії, з яких складається виробничий процес:

1. безперервне волокно, що гратиме роль зміцнювальної речовини, у вигляді мата просочують в спеціальній ванні речовиною матриці (термореактивною смолою, яка містить в собі розчинений каталізатор);

2. отримана просочуванням матів полімером субстанція протягується крізь нагріте сопло формуючого пристрою, де власне і формується необхідний профіль, а також відбувається твердіння речовини матриці (термореактивної смоли);

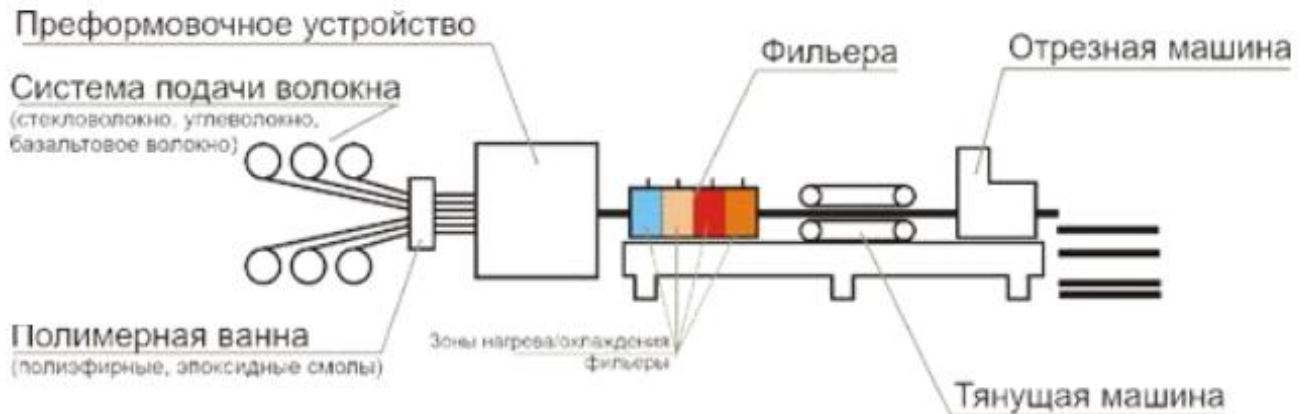


Рисунок 1.9 - Пултрузійна машина [9]

3. отриманий в такий спосіб профіль розрізається на секції потрібної довжини.

Близько 95% смол, що зараз використовуються в методі протягування перепадає на ненасичені поліефіри. Все решта – епоксидні смоли. Обладнання для методу отримання профілів зі скловолокна протягуванням на сьогодні все ще не надто продуктивне, і саме це є основним фактором, що досі перешкоджає ширшому виробництву і використанню тягнутих профілів зі склопластиків.

1.3 Характеристики склопластиків, їх властивості і структура

Отже склопластики, як і будь який інший композитний матеріал представляють собою комбінацію зміцнювальної речовини і матриці (в'язуча речовина). Матеріал матриці зазвичай характеризують за такими, важливими з технологічної точки зору параметрами, як здатність до змочування, в'язкість та ін.

Оскільки будь яких композитний матеріал містить також зміцнювальну речовину, в матеріалі обов'язково виникають зони поділу фази матричної речовини і наповнювача. Ці міжфазові шари мають великий сукупний вклад у формування механічних властивостей матеріалу. Було проведено розрахунки, згідно яких сукупна площа міжфазного шару в 1 мм^3 композитного матеріалу, вміст волокон в якому складає 50% об'єму сягає в середньому $450\text{--}600 \text{ мм}^2$.

Склад і структура граничних переходів між фазами матриці і армуючої речовини в композитному матеріалі дуже відрізняються від будови в'язучої речовини. Причина цього явища криється в тому, що на границі фаз речовина матриці містить окремі компоненти, які взагалі то є складовою зміцнювальною речовини, а не матриці. Ці граничні фазові переходи дають значний внесок у формування механічних властивостей матеріалу, через що вивчення з метою управління процесами їхнього контролю і формування надається велике значення. За своїм складом міжфазові шари є вельми неоднорідними. Через це їхня структура зміцнюється не стрибком, що своєю чергою значно ускладнює визначення товщини цього шару речовини композиту. Зазвичай вона коливається в межах від 10 нм до 5 мкм.

В діяльності людини широкому використанню склопластиків і постійному його поширенню сприяють такі основні властивості:

1. Невисока густина матеріалу

Середній показник густини склопластиків складає приблизно 1.7 г/см^3 . Взагалі цей показник коливається в межах від 1.4 до 2.1 г/см^3 . Навіть в легкого алюмінію цей показник становить 2.6898 г/см^3 , а в таких конструкційних металів як титан і сталь густина сягає 4.54 і 7.8 г/см^3 відповідно. Отже маємо, що в середньому густина склопластиків приблизно в три-п'ять разів нижча аніж у типових конструкційних металів, і до двох разів нижча за густину алюмінієвих сплавів. Завдяки цьому інженери конструктори при проектуванні транспортних засобів все частіше надають перевагу все ширшому використанню склопластиків, оскільки на будь якому транспорті економія пального завжди є анти-монотонною функцією від ваги як аргументу: зі зниженням ваги машин монотонно зростає економія пального.

2.1 Відмінні діелектричні властивості склопластиків

Незалежно від типу струму (постійний або змінний), склопластикам властиві відмінні електроізоляційні характеристики.

2.2 Стійкість до корозії

Механізм протікання електрохімічної корозії вимагає обов'язкової присутності трьох складових: аноду, катоду та електроліту. Оскільки склопластики, що є відмінними діелектриками, дуже погано підходять на будь-яку із цих ролей — вони вельми погано кородують. Це дозволяє використовувати склопластики в хімічно-агресивних умовах.

3.1 Зовнішній вигляд

Вироби зі склопластику без жодних проблем фарбуються і можуть довго зберігати колір за умови використання якісних і правильно підібраних фарб.

3.2 Прозорість

Радіо-прозорість склопластиків робить їх дуже привабливими в авіа-ракетобудуванні; окрім того, при використанні спеціальних світлопрозорих

смола отримують склопластики прозорі в оптичному діапазоні. Вже існують марки склопластиків, що майже не поступаються склу за оптичними характеристиками.

4. Тепло-ізолятори

Склопластики – це штучні матеріали із низькою теплопровідністю. Окремо деякі виробники пропонують склопластикові матеріали із помітно покращеними теплоізоляційними властивостями. Це досягається використанням технології, коли між шарами склопластику додатково вводиться пориста речовина. В якості останньої часто застосовують пінопласт. Його роль підвищити теплоізоляційні властивості матеріалу, утворюючи новий композитний матеріал на базі склопластику. Маючи високі теплоізоляційні характеристики, такі конструкції сендвічевого типу великим попитом як тепло-ізолятори в промисловості.

5. Відносно прості у виготовленні

6. Гарні механічні характеристики

Склопластикові матеріали демонструють відмінні фізико-механічні властивості. І це при невисоких значеннях густини матеріалу. Сьогодні для промисловості вже не є проблемою отримання склопластикових виробів, що за міцністю не поступаються, а часом навіть і перевершують вироби зі сталевих сплавів. Потрібні грамотний підбір матеріалу матриці, типу і орієнтації волокон. Зміцнювальна речовина, тобто її властивості, а також характер з'єднання (адгезії) матриці із волокнами грають провідну роль у формуванні механічних характеристик матеріалу склопластика. І навпаки – такі технологічні та експлуатаційні характеристики, як температури переробки та експлуатації склопластику – в'язучою речовиною.

Як вже вище зазначалось, орієнтація волокон також відіграє важливу роль. Безперервні, певним чином орієнтовані з урахуванням навантажень і напрямку їх дії волокна зроблять матеріал значно міцнішим у порівнянні із хаотичною орієнтацією волокон. Звичайно всі випадки прорахувати неможливо, так само як з технологічної точки зору безглуздим є виготовлення склопластиків неповторною структурою орієнтації волокон для кожного випадку. В промисловості, наразі, застосовують два типи орієнтації волокон склопластикових матеріалів – орієнтовані перехресно волокна, і односпрямовані. У першому випадку волокна орієнтовані під деякими кутами відносно одне одного, при тому що кути можуть бути різними у різних напрямках в матеріалі і змінними по довжині. Волокна, що орієнтовані відповідно до другого типу, звуться односпрямованими. Такі волокна орієнтовані паралельно одне одному по всій довжині матеріалу.

Іноді ізотропія є перевагою матеріалу. В таких випадках краще застосовувати склопластики з неорієнтованими волокнами. Технологічно їх отримують використанням рубаних волокон, які одночасно із матеріалом матриці методом напилення наносяться на форму. Також існують методи

отримання склопластиків із неорієнтованою структурою методом пресування, та ін.

Завдяки всім цим можливостям склопластики, як вище було зазначено, вже здатні скласти конкуренцію деяким сталям, і багатьом кольоровим металам. У таблиці 1.2 наведені з метою порівняння деякі типові значення окремих властивостей сталей і склопластиків [10]:

Таблиця 1.2 Порівняльні характеристики сталі й склопластику

Порівняльні характеристики сталі і склопластика		
Матеріал	Сталь	Склопластик
Густина, (кг/м ³)	7800	1800-1900
Модуль пружності, ГПа	210	55
Питомий модуль пружності, км	2692	2895-3056
Границя міцності при розтягу, МПа	240	1700
Питома границя міцності при розтягу, км	25.9	133
Відношення втомної міцності до статичної (кількість циклів 10 ⁷)	0.26	0.29
Теплопровідність при 20 °С, Вт·м ⁻¹ ·К ⁻¹	64	0.75
Питомий об'ємно-електричний опір, Ом	Провідник	1·10 ¹⁰
Коефіцієнт лінійного теплового розширення, 10 ⁻⁶ ·град ⁻¹	11.9-14.2	0.45-8.3
Гігроскопічність, %	-	0.5
Стійкість до дії хімічно агресивних середовищ і соляних розчинів	Не стійкий. Необхідні заходи із захисту від корозії	Стійкий
Експлуатаційні витрати	Потребує регламентних робіт з обслуговування не рідше 1-2 разів на рік	Відновлення шару фарби зі зниженням інтенсивності забарвлення
Можливість реалізації архітектурно-дизайнерських рішень	Потребує дорогої реконструкції обладнання	Потребує виготовлення недорогої технологічної оснастки

Основні фактори, що дають внесок у формування характеристик склопластикового матеріалу це: довжина скляних волокон, їхній діаметр та тип

орієнтації, що застосовується; проценте відношення вмісту скляних волокон у матеріалі до речовини матриці; властивості міжфазового шару, його сукупна площа, що приходить на одиницю об'єму матеріалу; від технології отримання склопластику.

Зміцнювальні скляні волокна, що найчастіше застосовуються у виготовленні склопластикових матеріалів конструкційного призначення, це алюмоборсилікатні і магнезіальноалюмосилікатні волокна. Використовують одинарні або комплексні ниті діаметром 6-19 мкм. Також використовуються джгути (або ровінги) із діаметром волокон 10-19 мкм. Використовуються в конструкційних склопластиках також склотканини. Іншим типом армування в конструкційних склопластикових композитах є наповнювачі «скло-шпон» – листи та стрічки, що виготовляються за технологією СВМ із волокон діаметром 100-200 мкм. Для склопластиків, що виготовлені із використанням в якості армувальних волокон склотканин різного плетіння існує спеціальна назва – склотекстоліти [11].

До матеріалу матриці, що використовується в композитному матеріалі висувається безліч вимог. Основні з них це: здатність утворювати міцні зв'язки із матеріалом волокон (здатність до високої адгезії); здатність швидко тверднути при кімнатній температурі; високі показники змочування (просочування) зміцнювальної речовини; здатність бути міцним матеріалом після тверднення; низька усадка (втрата об'єму) під час твердіння; висока хімічна стабільність, що дозволяє тривале зберігання; мінімум летких, а особливо шкідливих, елементів; відмінні властивості матеріалу, що впливають на технологічність його застосування, експлуатаційну придатність (водостійкість, зносостійкість, світлостійкість, теплостійкість тощо); невисока вартість отримання матеріалу; легкість в утилізації відходів виробництва і самого матеріалу по завершенні строку служби.

Сьогодні на підприємствах для виготовлення різних полімерних матеріалів найчастіше в якості речовини матриці використовуються реактопласти і термопласти. Поліпропілен, полісульфон, поліаміди та ін., що входять до складу термопластів, це речовини з високою в'язкістю, вони є твердими матеріалами вже за кімнатної температури. Використання таких матеріалів у виготовленні композитів можливе лише після переведення їх у рідкий стан, наприклад через нагрівання.

Таблиця 1.3. Типові характеристики різних склопластиків

Показник	Епоксидні з орієнтованим наповнювачем			Поліефірні з неорієнтованим наповнювачем		Поліамідні і полікарбонатні армовані короткими волокнами
	Однонаправлені ниті, джгути	Перехресні ниті, джгути	Склотканина	Напилені рублені волокна	Склохост, скломат	
Довжина волокна, мм	Безперервне	Безперервне	Безперервне	30-60	30-60	3-12
Вміст волокна, % маси	74-82	70-78	60-62	30-35	30-40	До 50
Густина, г/см ³	2.0-2.2	1.8-2.1	1.6-1.9	1.4-1.5	1.4-1.6	1.2-1.55
Міцність, МПа						
При розтягу	1200-2300	700-1200	400-800	95-120	40-70	90-180
При згині	1500-2500	800-1500	500-1000	150-240	40-80	100-250
При стиску	600-1500	350-700	300-600	80-130	45-120	100-150
Модуль пружності, ГПа	50-70	25-35	20-40	6-9	6-7	3.4-9.5

З технологічної точки зору відходи виробництва композитних матеріалів, створених на основі термопластів легко утилізуються, через відсутність хімічних зв'язків між їхніми макромолекулами. Те, що такі композити легко утилізуються є сильною стороною термопластів. Іншою їхньою сильною стороною є майже повна відсутність токсичних газоподібних продуктів під час виробництва. Ще однією перевагою є те, що заготовки, необхідні для виробництва деталей з композитів на основі термопластів мають практично необмежений термі зберігання. Це значно спрощує логістичні проблеми на виробництві.

Не зважаючи на всі ці численні переваги сьогодні для виготовлення склопластикових композитів більше застосовують так звані олігомерні сполуки.

Таблиця 1.4. Характеристики типових матеріалів, що застосовуються для виробництва армованих пластиків

Властивості	Смоли				
	Поліефірні	Фенол-формальдегідні	Епоксидні	Кремній-органічні	Полімідні
Густина, г/см ³	1.1-1.46	1.2-1.36	1.1-1.4	1.15-1.36	1.2-1.45
Модуль пружності при розтягу, ГПа	1.5-4.5	1.4-6.8	1.9-5.0	1.5-3.7	3.2-5.5
Міцність при розтягу, МПа	23.5-68.5	22.5-78.3	27.4-140	6.8-34.2	90-95
Відносне подовження при розриві, %	0.5-0.6	0.3-0.4	1.2-10.0	0.3-1.5	1.0-4.0
Питома ударна в'язкість, кДж/м ²	2.0-10.7	2.0-11.3	2.9-24.5	2.3-5.4	4.0-12.0
Температурний коефіцієнт лінійного розширення, 10 ⁻⁶ /К	60-90	60-80	48-80	20-40	50-58
Усадка при твердінні, %	4-15	0.5-7.0	0.5-3.6	2.1-4.3	0.5-2.0
Водопоглинання за 24 години, %	0.15-0.6	0.15-0.6	0.03-0.2	0.05-0.2	0.01-0.6
Коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К)	0.12-0.23	0.23-0.27	0.17-0.21	0.4-0.6	0.35-0.37
Діелектрична проникність	4.1-4.5	3.0-5.0	3.2-4.5	2.6-4.2	3.4-3.8
Питомий об'ємний електричний опір, Ом·м	6·10 ¹² -1·10 ¹³	1·10 ⁹ -1·10 ¹⁰	8·10 ¹³ -1·10 ¹⁴	1·10 ¹² -1·10 ¹³	1·10 ¹⁴ -1·10 ¹⁵
Тангенс кута діелектричних втрат, град.	0.022-0.024	0.015-0.035	0.01-0.03	0.001-0.025	0.001-0.005
Теплостійкість за Мартенсом, °С	60-80	140-180	140-150	250-280	250-370

Олігомери за кімнатної температури є рідкими, тому це значно пришвидшує процес просочування і робить його більш технологічним. До групи олігомерів входять кремнійорганічні, фенол-формальдегідні, епоксидні, поліефірні та інші смоли. Майже всі вони (всі перелічені) застосовуються в якості речовини матриці у різних композитних матеріалах, зокрема у склопластиках. До недоліків олігомерів можна віднести виділення токсичних газоподібних сполук під час виробництва. Характеристики різних матеріалів, що широко застосовуються в якості матеріалу матриці наведені в таблиці 1.4 [12].

Під час виготовлення склопластику для просочення волокон використовується розчин, що містить в собі головним компонентом смолу, яка після тверднення виконуватиме роль речовини матриці; окрім неї складовими компонентами розчину є добавки для регулювання характеристик смоли, затверджувач там прискорювач твердіння, барвники та інші добавки, що додаються в розчин або з метою підвищення технологічності процесу виробництва, або з метою впливу на характеристики виробу. В таблиці 1.5 з метою порівняння наведено типові характеристики склопластиків, виготовлених на основі олігомерних смол в якості в'язучої речовини [12].

Таблиця 1.5. Характеристики склопластиків на основі деяких полімерів

Найменування показника	Одиниця виміру	Значення показника для склопластиків на основі різних видів смол		
		Поліефірна	Епоксидна	Фенол-формальдегідна
Густина	г/см ³	1.4-1.75	1.6-1.9	1.5-1.8
Міцність при розтягу	МПа	140-450	400-600	300-500
Міцність при статичному вигині	МПа	150-500	400-800	200-600
Міцність при стисканні	МПа	150-300	200-400	100-300
Модуль пружності при розтягу	ГПа	11-25	22-32	18-25

На основі даних, наведених в таблиці 1.5 можна зрозуміти, що склопластикові матеріали виготовлені із застосуванням епоксидних смол в якості в'язучої речовини є більш міцними і витривалими за будь яких типів навантаження.

Як і будь який композитний матеріал на основі полімерів, для склопластику характерним є те, що просторова взаємна орієнтація волокон наповнювача відіграє значну роль у формуванні характеристик матеріалу, а не лише тип волокон.

Відповідно, склопластики, що виготовлені з безперервних волокон за технологіями орієнтованих волокон відносять до основних трьох типів: односпрямовані – паралельне одне одному волокна вздовж всієї довжини виробу; перехресні волокна (волокна орієнтовані під деякими кутами відносно одне одного, при тому що кути можуть бути різними у різних напрямках в матеріалі і змінними по довжині); і просторово-армовані, тобто коли застосовується більше, аніж дві напрямні площини армування, рисунок 1.10.

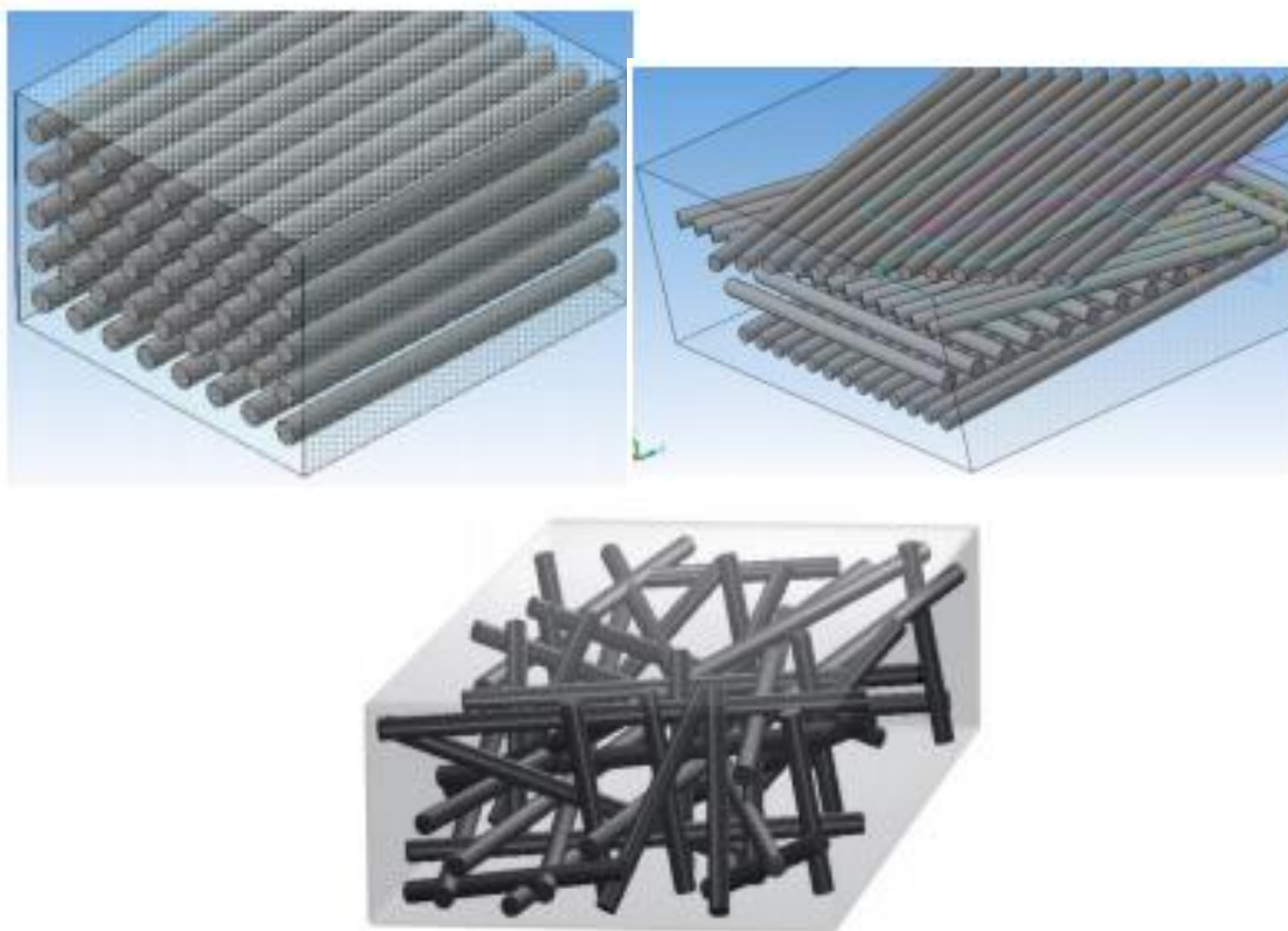


Рисунок 1.10 - Типи орієнтації волокон у склопластиках

Для деяких композитних матеріалів, і для деяких склопластиків також, характеристики матеріалу по декількох напрямках можуть бути майже однаковими, хоча такий матеріал отримано не за технологією з неорієнтованими волокнами і не є ізотропним в цілому. Наприклад, у випадку склопластиків виготовлених методом косошарово-поздовжнього поперечного намотування (КППН) міцність як в осьовому, так і в кільцевому напрямках майже однакова через взаємно-перпендикулярний характер орієнтації волокон матеріалу.

В склопластикових трубах в якості речовини матриці зазвичай використовують епоксидні смоли. Міцні скляні ниті використовують як матеріал зміцнювальних волокон. Деякі механічні, а також фізичні характеристики, притаманні таким склопластикам наведені в таблиці 1.6 [13].

Таблиця 1.6 - Фізико-механічні характеристики склопластику, отриманого методом косошарово-поздовжнього намотування

Міцність, кг/мм ²	Розтяг	В кільцевому напрямку	60-100
		В осьовому напрямку	20-35
	Стиск	В кільцевому напрямку	30-50
		В осьовому напрямку	15-30
	Зріз	Повздовж волокон	1-4
		Поперек волокон	15-25
	Згин	В осьовому напрямку	50-70
Модуль пружності, кг/мм ²	В кільцевому напрямку		3-5·10 ³
	В осьовому напрямку		2.0-3.5·10 ³
Коефіцієнт лінійного теплового розширення, 10 ⁻⁶ К ⁻¹	В кільцевому напрямку		8-12·10 ⁻⁶
	В осьовому напрямку		20-30·10 ⁻⁶
Ударна в'язкість, кДж			1.97·10 ³
Коефіцієнт теплопровідності, Вт/(К·м)	В кільцевому напрямку		0.5-0.7
	В осьовому напрямку		0.1-0.43
Коефіцієнт Пуассона	В кільцевому напрямку		0.28-0.32
	В осьовому напрямку		0.15-0.22
Температура експлуатації, °С			-60...+150

1.4 Деякі особливості обробки деталей зі склопластиків ріжучим інструментом

Вище вже було зазначено, що процес механічної обробки композитних матеріалів відрізняється деякими особливостями. Це повною мірою стосується і різних типів склопластикових матеріалів. В цій статті буде досліджено процес фрезерування склопластиків. Отже з метою підвищення технологічності механічної обробки і якості отриманого виробу необхідно враховувати такі фактори:

1. Температурний вплив на ріжучий інструмент і заготовку.

Мається на увазі що через невисоку теплопровідність склопластикових матеріалів відведення теплоти із зони різання в заготовку, а також разом зі стружкою мінімізується. Це дуже негативно впливає на інструмент, значно підвищуючи інтенсивність зношування ріжучих кромek і поверхонь (рис. 1.11). До того ж, внаслідок повільного відведення теплоти із зони різання можливий локальний перегрів поверхні виробу, який можна охарактеризувати як припалена поверхня (рис. 1.12) [14].

2. Абразивна дія скляних ниток.

Скло є вельми твердою речовиною, яка у вигляді волокон присутня у матеріалі. Тверді включення скляних волокон в матриці, що кришаться під час фрезерування на малі частки, значно підвищує зношення фрез. Іще більше погіршує умова фрезерування їхня дискретність в структурі матеріалу (рис. 1.13).



Рисунок 1.11 - двозуба кінцева фреза (інструментальний матеріал Р6М5) після роботи при температурі понад 300 °С



Рисунок 1.12 – Розшарування і припали обробленої поверхні

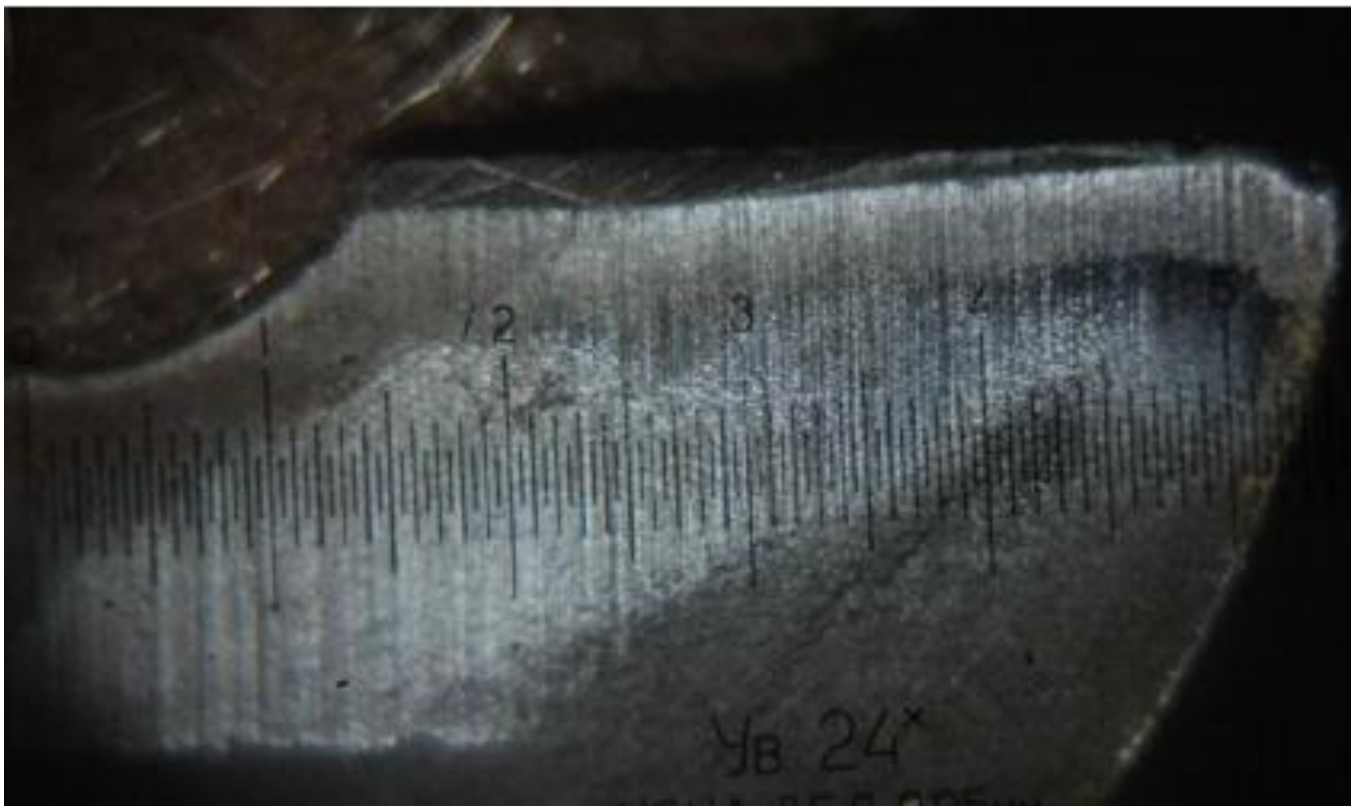


Рисунок 1.13 - Абразивний знос інструменту по задній поверхні

3. Вплив речовини матриці на процес зношування фрез.

Структура матеріалу полімеру матриці під час різання руйнується, внаслідок чого виникає явище так званого механіко-хімічного адсорбційного зношування інструменту.

4. Негативний вплив пружності матеріалу.

Через специфічні пружні властивості композитного матеріалу відбувається збільшення площі контакту інструменту із матеріалом. Наслідком цього явища є підвищений знос інструменту по задній поверхні.

5. Технологічний критерій зносу.

Технологічний фактор також відіграє важливо, а часом і провідну роль у визначенні величини допустимого зносу фрези. Наступні технологічні фактори впливають на те, що при обробці склопластиків значення допустимого зносу нижче, аніж у випадку обробки металів:

5.1. Вище вже зазначені пружні властивості склопластику, сама його волокниста структура призводять до виникнення похибок форми.

5.2. Характерні для композитних матеріалів дефекти структури, такі як розшарування, відколи тощо.

5.3. Високі ціни на спеціальний інструмент. Найкращим вибором для механічної обробки склопластикових заготовок є твердосплавний інструмент з алмазним напиленням. Проте висока ціна на такий інструмент робить його застосування економічно недоцільним.

5.4. Під час механічної обробки склопластику, внаслідок його дисперсної структури, на його поверхні утворюються численні мікро тріщини. Через це значно підвищується здатність матеріалу поглинати вологу, а тому не можна застосовувати змащувально-охолоджуючі рідини під час обробки склопластиків. Під час фрезерування дозволяється охолодження виключно обдувом.

5.5. Під час фрезерування склопластику скляні волокна подрібнюються в дрібний пил, що є дуже небезпечним для людини і при потраплянні в легені може призвести до захворювань дихальних шляхів. Тому фрезерування склопластику є виробництвом з особливо шкідливими умовами праці, що потребує відповідних заходів із охорони праці.



Рисунок 1.14 – Дрібний пил із включенням часток скла по завершенню процесу фрезерування склопластику

1.5 Конструкції фрез для обробки склопластику

Для фрезерування склопластиків використовують як збірні фрези, так і конструктивно суцільні із нагостреними або затилованими зубами.

Під час обробки пазів, площин, деяких фасонних поверхонь використовують фрези із гострим зубом. Проте часто при обробці фасонних поверхонь формування задньої поверхні ріжучої частини фрези здійснюють за певною кривою. Цей процес зветься затилування і виконується він із метою зменшення похибки складної форму готового виробу.

Суцільні фрези не потребують слюсарних операцій з метою підготовки для роботи. Окрім того, виробникові фрези набагато легше спроектувати і виготовити фрезу із оптимальними конструктивно-геометричними формами під задані цілі, якщо вона є суцільною. Проте в таких фрез є і недоліки. Основним недоліком таких типів фрез є те, що в разі поламки, або зношування хоча би

одного із зубів такої фрези (див. рис. 1.15), його неможливо просто замінити на новий і продовжити роботу. У кращому випадку фреза підлягатиме переточуванню, що потребує або спеціального обладнання, або високої кваліфікації працівника. Часто у випадку поламки такої фрези відновити не можливо і доводиться замінити всю фрезу, що часто коштує чималих коштів.



Рисунок 1.15 - Поломка зуба фрези фірми Iscar

При фрезеруванні композитних матеріалів, включно зі склопластиками перспективним із міркувань економії матеріалів могло би бути виготовлення збірних фрез спеціальних конструкцій. Проте, зрозуміло, що перелічені вище пункти, що є перевагами суцільних фрез автоматично становляться недоліками збірної конструкції. Окрім того такі фрези мають значно більші габарити.

Тому деякі виробники сьогодні пропонують спеціальні фрези суцільного виконання, одним із призначень яких є обробка склопластиків. Деякі із таких фрез наведено на рисунку 1.16 [15].

Кінцеві фрези є самим універсальним інструментом в арсеналі будь я кого технолога. З точки зору фрезерування склопластику це також справедливо.

Головне призначання кінцевих фрез – обробка пазів, уступів, взаємно перпендикулярних поверхонь, контурна обробка тощо. В дрібносерійному виробництві кінцеві фрези можуть використовувати і з метою торцювання поверхні виробу. Тобто, іншими словами, в загальному випадку це трьох-координатний інструмент, рідше – двох координатний (кінцеві фрези із відсутніми торцевими зубами). Кріпляться кінцеві фрези в шпинделі верстата за допомогою конічного, або циліндричного (більш розповсюдженого) хвостовика.



Рисунок 1.16 - Фрези спеціальної конструкції для обробки склопластику а – Борфреза з перехресно-нанесеними рисками; б – Борфреза з перехресно-нанесеними рисками і свердлом; в – фреза із різноспрямованими спіральними канавками; г – багатозуба фреза із великим кутом нахилу канавок; д – Борфреза зі зворотним ріжучим торцем; е – кінцева фреза з ненахиленим зубом і розподільними канавками; ж – сферична кінцева фреза з перехресно-нанесеними рисками (тип конструкції «кукурудза»); з – кінцева фреза $Z = 1$, із прямим зубом призначена для високошвидкісної чистової обробки; и – кінцева фреза з одним зубом для високошвидкісної обробки, $Z = 1$, права спіраль із переривчастою ріжучою кромкою; к – кінцева фреза, $Z = 3$, спіраль 45° , з нерівномірним кроком різальних крайок.

Поділяються кінцеві фрези на наступні категорії:

-звичайні кінцеві фрези із рівномірним або нерівномірним окружним кроком зубів із конічними або циліндричними хвостовиками;

-фрези із твердосплавними гвинтовими пластинками, оснащені коронками;

-шпонкові кінцеві фрези;

-для фрезерування Т-подібних пазів;

-для сегментних шпонок.

В ході роботи застосовуватимуться звичайні кінцеві фрези із циліндричним хвостовиком (приклад таких фрез на рисунку 1.17).

1.6 Огляд САПР для моделювання процесу фрезерування

Для виконання кінцево-елементного моделювання і аналізу сьогодні створено багато різноманітних програм. Існують навіть спеціалізовані програмні засоби в області моделювання механічної обробки, в тому числі фрезерування, такі як AdvantEdge, або DEFORM. Найвідоміші серед універсальних це: ANSYS, ABAQUS, AUTODYN, LS-DYNA та деякі інші.

Основні особливості кожної FEA системи, що нам знадобляться в процесі моделювання механічної обробки, це:

- задання геометрії;
- задання матеріалів;
- можливість роботи із композитними матеріалами;
- створення сітки;
- робота програми із граничними умовами;
- результати проведених розрахунків.

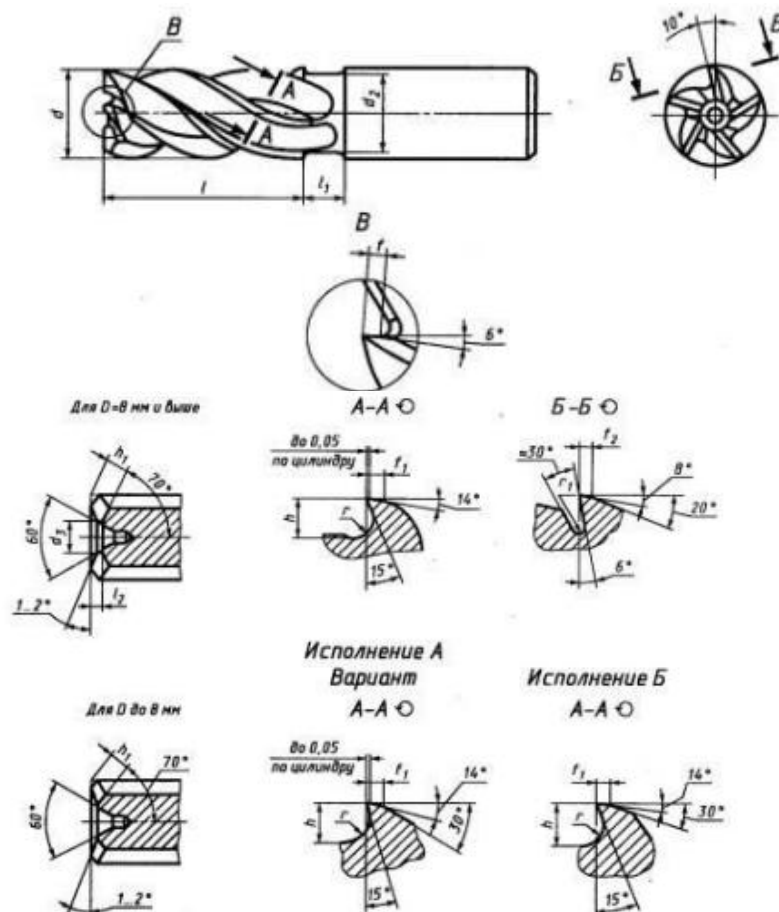


Рисунок 1.17 - Кінцева фреза за ГОСТ 17025-71 [16]

Звісно, нас дуже цікавить можливість задання композитного матеріалу. Оскільки процес фрезерування таких матеріалів є значно складнішим за фрезерування звичайних металів, то саме наявність можливості моделювання обробки композитного матеріалу є одним з головних критеріїв вибору FEA програми.

В системі LS-DYNA є можливість задання анізотропних характеристик композиту завдячуючи великій кількості типів моделей матеріалу. Проте в цій системі відсутній зручний інструмент, що дозволяє створювати різні шари матеріалу.

В таких програмних засобах, як ANSYS і ABAQUS існує можливість задавати композит шар за шаром, із вказанням властивостей таких, як напрямок викладки шару, його товщина і ін. існує можливість роботи як з твердотільними (англ. Solid), так і з поверхневими моделями з використанням зазначених можливостей. Таблиця 1.7 приведена з метою порівняння можливостей різних найпоширеніших FEA систем [17].

Таблиця 1.7 - Порівняльні характеристики CAE систем

	ANSYS WorkBench	LS-DYNA	AUTODYN	ABAQUS	DEFORM	AdvantEdge
Задання геометрії	++	+++	++	+++	+++	++
Накладання сітки	+++	+	++	++	++	+++
Задавання матеріалів	+++	+	+++	++	+++	++
Граничні умови	+++	+	++	++	+++	+++
Розрахунок	+	+++	++	++	++	++
Результат	++	+++	+	++	++	++
Працюють з композитними матеріалами	Так (модулі ACP)	Так (бібліотека типів матеріалів)	Ні	Так (існує 3 типи елементів)	Ні	Ні

Умови в таблиці:

1. Створення геометрії:

+++ доступні такі можливості, як зміна геометричних параметрів об'єктів і положення в просторі, експорт та імпорт геометричних даних, ескізне моделювання тощо;

++ доступне все те саме що і раніше, окрім того що в цьому випадку неможливим є переміщення в просторі;

2. Сітка:

+++ існує можливість дуже гнучко проводити налаштування сітки (мається на увазі регулювання типу елементів, їхнього розміру, локальної гущини елементів і т. ін.), система автоматично накладає сітку і проводить оптимізацію під конкретну модель;

++ система все ще здатна автоматично накладати сітку проте існує потреба власноруч задавати потрібні параметри. Можливості налаштування сітки дуже гнучкі;

+ SPH – без сітчасті методи;

3. Задання матеріалу:

+++ в системі існує своя бібліотека матеріалів, додатково існує можливість коригування матеріалів із бібліотеки, додатково існує можливість створювати нові матеріали і додавати в бібліотеку;

++ можливість створювати матеріали. Бібліотека матеріалів відсутня;

+ бібліотека матеріалів і можливість додавання нових матеріалів відсутні. Існує бібліотека типових груп матеріалів із регулюванням властивостей для отримання максимально наближених характеристик до конкретного матеріалу;

4. Граничні умови:

+++ існує можливість додавання зовнішніх факторів, таких як температура навколишнього середовища, гравітація тощо. Інтерфейс дозволяє виконувати автоматично накладання зв'язків між об'єктами;

++ все ще існує можливість додавати зовнішні фактори. Накладання зв'язків між об'єктами і регулювання характеру контакту відбувається в полу автоматичному режимі;

+ всі налаштування відбуваються власноручно.

1.7 Критерій стійкості інструменту

Стійкість інструменту T – це час роботи інструменту на заданих режимах між переточуваннями. Для різних типів інструментів для різноманітних умов роботи (глибина різання, швидкість різання, швидкість подачі і т. ін.) при обробці різних матеріалів створені спеціальні таблиці зі значеннями стійкості для довідки. Проте, наразі таких таблиць не створено для умов обробки композитних матеріалів через нестачу досліджень з метою виявлення залежності між технологічними параметрами різання, матеріалом обробки, конструктивними параметрами фрез і кінцевими параметрами обробленої поверхні.

За результатами літературного огляду можна дійти висновку, що здатність інструменту до обробки поверхні із виконанням технічних вимог по кресленню характеризується зношуванням інструменту по задній поверхні. Отже в цій роботі саме зношування інструменту по задній поверхні $h_{з.п.}$ (мм) (далі h) буде прийнято в якості критерію, який визначатиме стійкість різця T (хв).

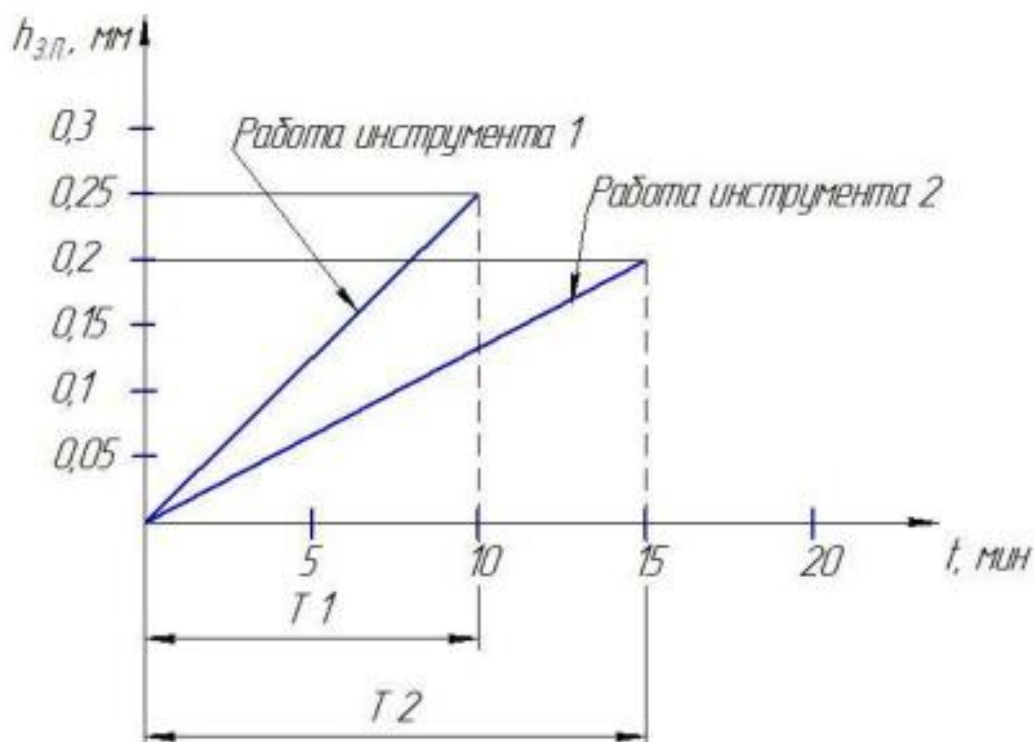


Рисунок 1.18 – Приклад взаємно однозначного зв'язку між стійкістю інструмента T (хв) і критерієм стійкості $h_{з.п.}$

Тобто, в цій роботі стійкість фрези T , тобто час роботи фрези в хвилинах, буде враховуватися критерієм стійкості інструменту h (зношуванням по задній поверхні, мм).

Максимальні рекомендовані значення зношування по задній поверхні під час обробки склопластиків, що були виявлені в ході літературного огляду становлять 0.3 мм. Прийmemo його для подальшої роботи.

1.8 Мета і завдання дослідження

За винятком окремих випадків для призначення режимів різання галузевий стандарт ОСТ 5.9569-74 сьогодні є єдиним джерелом інформації для інженерів технологів. Проте відтоді як в 1974 році було створено цей стандарт, у світі з'явилась величезна кількість різноманітних композитних матеріалів і було вдосконалено ті, що існували в той час. Кількість нових матеріалів зростає вражаючими темпами. Все це ніяк не враховано в ОСТ 5.9569-74, тому він не підходить для призначення режимів різання а таких випадках.

Сьогодні великі гравці на ринку виготовлення ріжучих інструментів, такі як Sandvik Coromant, Walter AG, Iscar, Guhring та ін. мають що запропонувати покупцеві для обробки композитів. Проте, дуже часто виробник може надати інформацію щодо призначення режимів різання лише по одному-двом конкретним маркам композиту, і ці рекомендації не надто дієві при обробці інших, що виявляється в не такій високій якості обробки і стійкості фрези, як очікувалося.

Сьогодні на кожному підприємстві технологи можуть призначати режими обробки користуючись лише власним досвідом, що повільно набувається методом спроб і помилок. Звісно це відображається на вартості готової продукції через зниження продуктивності виробництва.

Тому можна говорити про те, що дослідження того, як зношується інструмент під час фрезерування склопластику, а також як в той самий час технологічні параметри обробки впливають на зношування інструменту і на якість поверхні обробленого виробу, є актуальним.

Мета дослідження: підвищити стійкість кінцевих фрез під час фрезерування склопластику через вироблення методики із раціонального призначення режимів різання.

Завдання:

1. Провести детальний літературний огляд з метою виявлення наукових знань що стосуються теми дослідження.

2. Для проведення дослідження розробити методику у відповідності до якої проводити подальші роботи.

3. Використати систему FEA (finite element analysis) ANSYS із метою моделювання процесу фрезерування склопластику.

4. Виконати експериментальне дослідження із метою впливу технологічних параметрів на якість обробленої поверхні і зношування інструменту.

5. Розробити рекомендації для використання розробленої методики підприємствами.

Наукова новизна:

1. Під час роботи планується отримати емпіричні рівняння для проведення практичних розрахунків параметрів фрезерування склопластиків виготовлених за технологією КППН.

2. Також планується встановити залежність між технологічними параметрами (глибина різання, подача, швидкість різання) і властивостями обробленої поверхні (глибина дефектного поверхневого шару, шорсткість).

Практична цінність:

1. В ході проведення дослідження планується отримати рівняння, що матимуть практичну цінність на різних підприємствах, де використовується технологія фрезерування склопластиків як інструмент проведення розрахунків із метою призначення режимів різання в діяльності інженерів технологів.

2. Передбачається, що розроблена в ході дослідження методика буде універсальною і може бути використаною для встановлення аналогічних емпіричних рівнянь обробки інших марок склопластиків або інших композитних матеріалів (наприклад, вуглепластиків).

2 Метод дослідження

2.1 Планування дослідження

Кінцевою метою проведення цього дослідження є встановлення емпіричних рівнянь, що пов'язують між собою технологічні параметри обробки склопластику (глибина різання, подача, швидкість різання) і підсумкові параметри, що визначатимуть якість і технологічність обробки (стійкість фрези, температура в зоні різання, шорсткість поверхні по завершенні фрезерування). Підсумкові значення змінних будуть задаватися технологом як параметричні змінні при вирішенні системи рівнянь типу:

$$Ra = F_1(V, t, S); \quad (2.1)$$

$$h = F_2(V, t, S); \quad (2.2)$$

$$T = F_3(V, t, S); \quad (2.3)$$

де Ra – шорсткість фрезерованої поверхні (мкм); h – знос по задній поверхні фрези (мм); T – очікуване значення температури в зоні різання ($^{\circ}\text{C}$); V – швидкість різання (м/хв); t – глибина різання під час обробки (мм); S – швидкість подачі (мм/об).

Під час літературного огляду були виявлені лише досить широкі діапазони рекомендованих режимів різання. Натомість, чітких рекомендацій щодо використання зазначених діапазонів при виборі режимів різання при фрезеруванні склопластиків не було виявлено. Діапазони рекомендованих режимів різання, виявлені під час літературного огляду мають наступний приблизний вигляд: інтервал для швидкості різання $v = 63 \dots 200$ м/хв; можливі значення швидкості подачі $S = 0,02 \dots 0,1$ мм/зуб; глибина фрезерування в межах $t = 1 \dots 10$ мм. В таблиці 2.1 наведена матриця планування експерименту.

Таблиця 2.1 - Матриця планування експерименту

Номер серії	v , м/хв	S , мм/зуб	t , мм
1	63 (-)	0.02 (-)	10 (+)
2	63 (-)	0.1 (+)	1 (-)
3	200 (+)	0.1 (+)	10 (+)
4	200 (+)	0.02 (-)	1 (-)

2.2 Матеріал для проведення дослідження

В якості матеріалу для проведення дослідження було обрано склопластик косошарово-поздовжнього поперечного намотування (труба за ГОСТ Р 53201-2008), із наступними характеристиками:

1. межа міцності: в осьовому напрямку 880 МПа; в тангенціальному – 460 МПа;
2. густина $1.97 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^3$;
3. модуль пружності при розтягу 263 ГПа



Рисунок 2.1 - Взаємне розташування волокон в заготовці для дослідження

Обрана заготовка – склопластикова труба із товщиною стінки 8 мм, довжиною 150 мм і діаметром 120 мм.

Хімічний склад обраного склопластику: матриця – епоксидна смола похідна від складного вінілового ефіру бісфенолу А; зміцнювальні волокна – S-скло марки ВМП (S – високоміцне) із хімічним складом 55-60% SiO_2 , 11-16% MgO , 24-27% Al_2O_3 .

Додатковою роботою в ході проведення дослідження була спроба оцінити глибину дефектного шару. З цією метою зріз труби після фрезерування був оброблений пенетрантом WB-100 для кольорової дефектоскопії виробництва фірми Sherwin [18]. Далі оброблений зріз труби був розділений на окремі фрагменти, із яких потім на спеціальному пристрої METAPRESS-P за допомогою компаунду були створені зразки для подальшого аналізу на електронному мікроскопі (див. рис. 2.3).

На жаль по одержаним в такий спосіб зображенням не вдалось розрахувати глибину дефектного шару після фрезерування за глибиною проникнення пенетранту через недостатню якість зображення. Проте отримані зображення були використані для дослідження структури матеріалу (рис. 2.4-2.5) і за допомогою програмного забезпечення електронного мікроскопу було оцінено діаметр волокна (табл. 2.2, рис. 2.6).

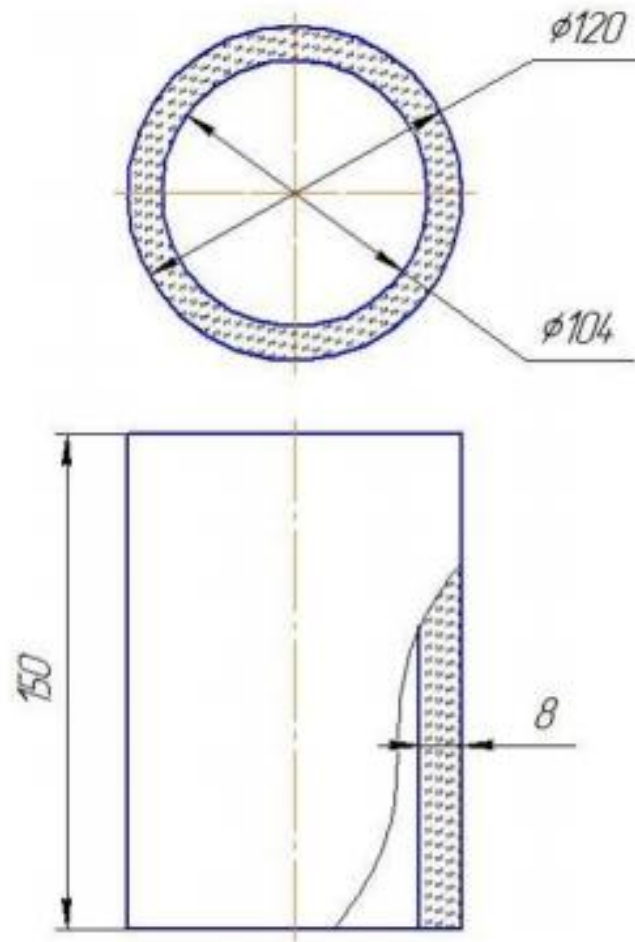


Рисунок 2.2 - Ескіз заготовки

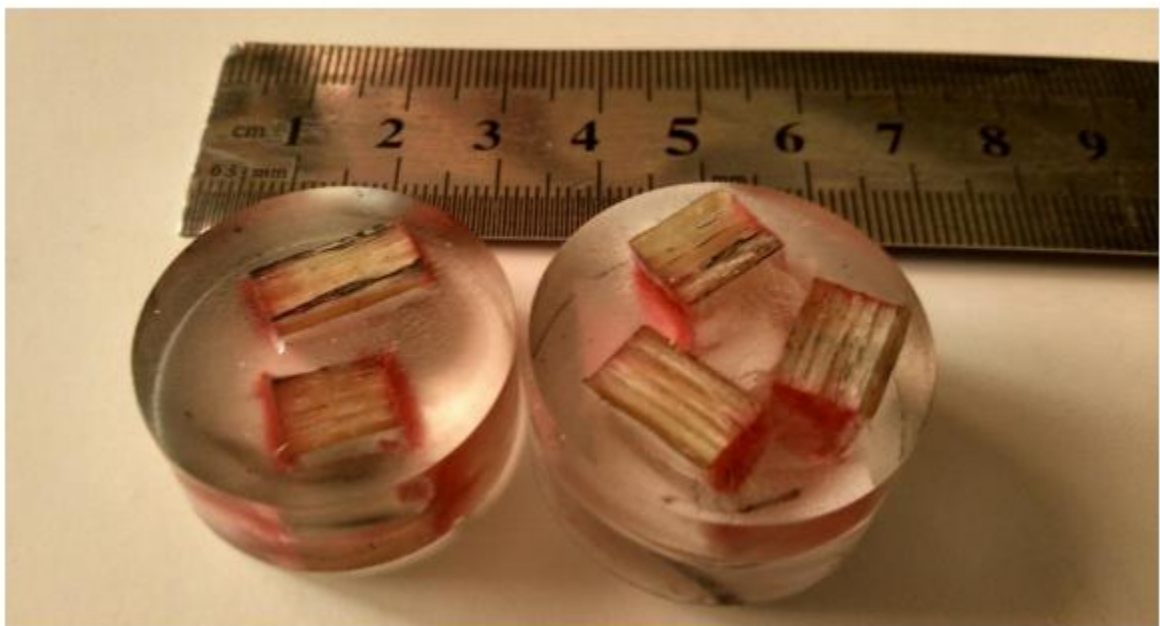
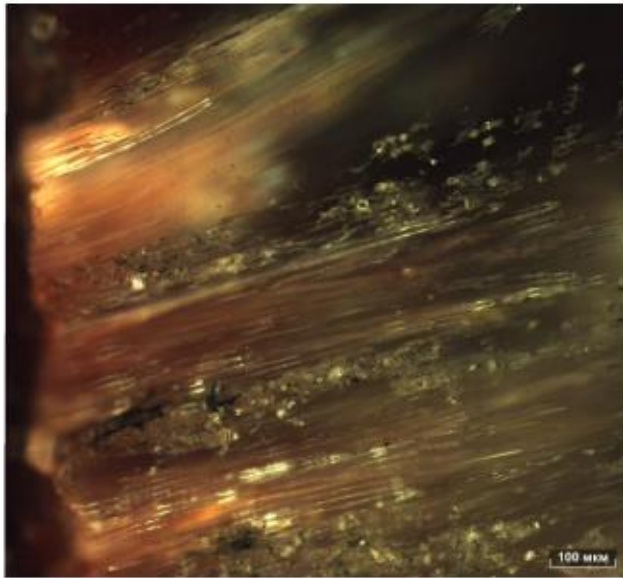
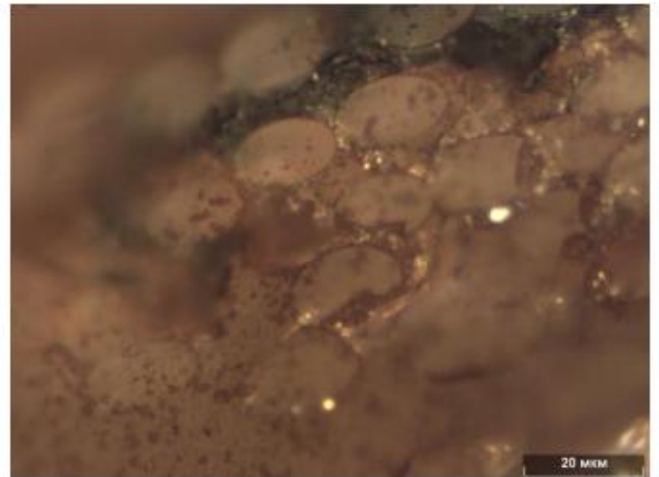


Рисунок 2.3 - Підготовлені для дослідження на мікроскопі зразки склопластику



а)



б)

Рисунок 2.4 – Спроба дослідження дефектного шару, а - збільшення $\times 200$, б - збільшення $\times 500$

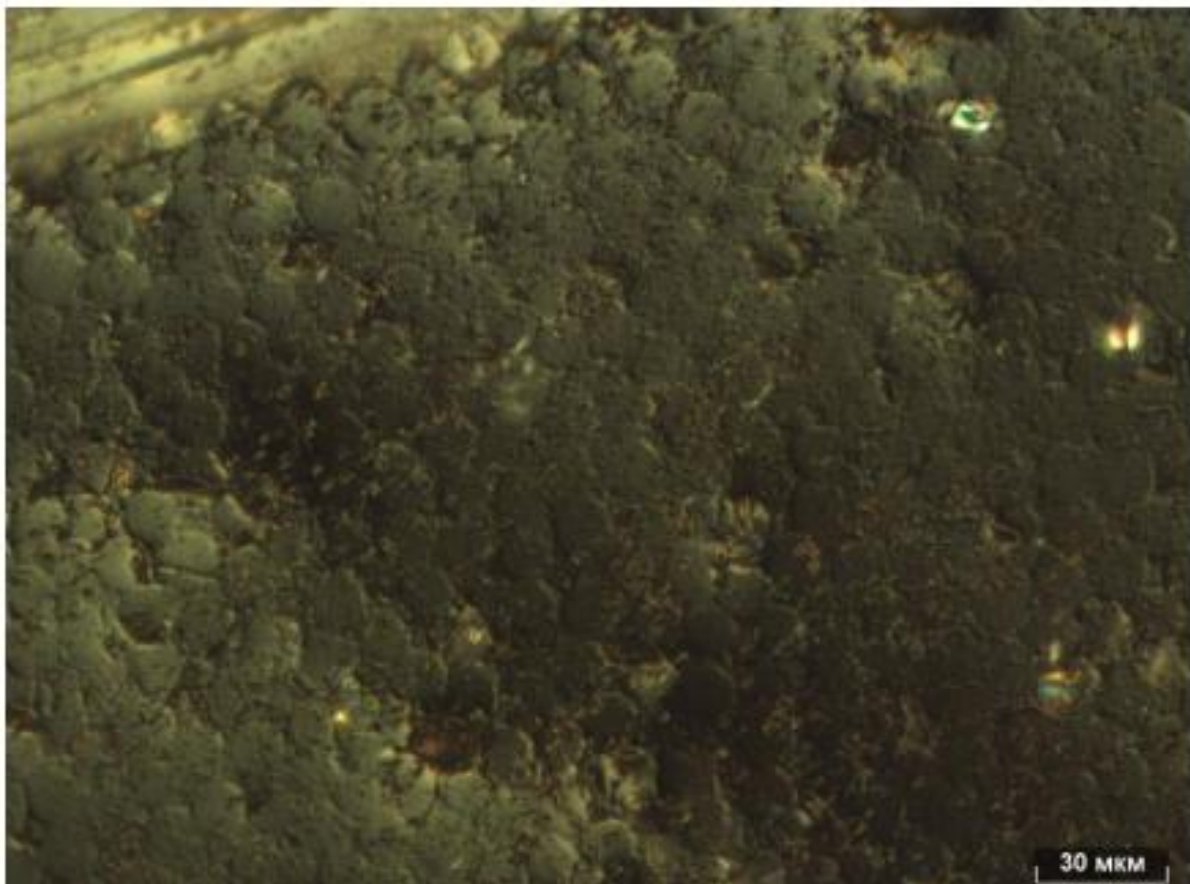


Рисунок 2.5 - Структура зразка, збільшення $\times 200$

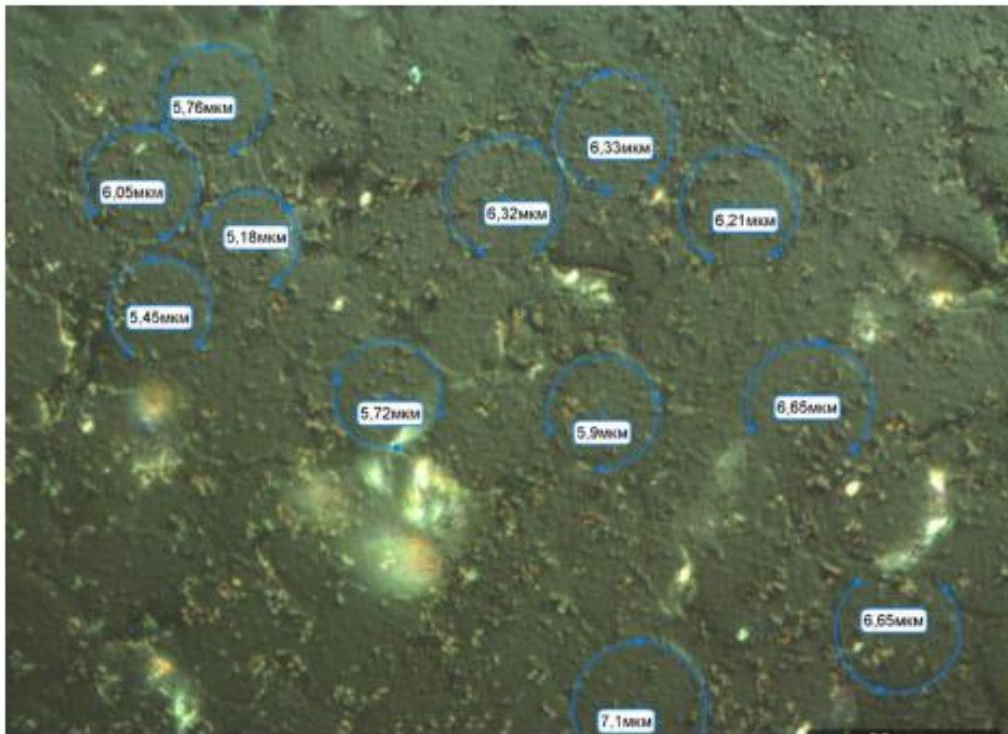


Рисунок 2.6 - Автоматизований розрахунок діаметра скловолокна, збільшення $\times 500$

Таблиця 2.2 - Вимірювання радіуса кривизни

Вимірювання радіусу кривини					
Група	Кількість вимірювань	Радіус кривини	Стандартне відхилення	Довірчий інтервал	Відносна точність
Група 1	12	6.11	0.55	0.32	5.16
Номер вимірювання			Радіус кривини, мкм		
1			6.324772		
2			5.183602		
3			5.720485		
4			6.21215		
5			6.045218		
6			6.334311		
7			5.763069		
8			5.453798		
9			7.102797		
10			6.649198		
11			5.901447		
12			6.648349		

За отриманими результатами вимірювань можлива більш адекватна побудова математичної моделі фрезерування склопластику в середовищі ANSYS.

2.3 Обладнання для роботи

В ході проведення дослідження використовуватиметься наступне обладнання:

1. фрезерні верстати з ЧПК ГФ2171 і VMC850 (рис. 2.7);
2. трикулачковий патрон в якості технологічної оснастки з метою закріплення заготовки;
3. за вимогами правил охорони праці верстати обладнані системами видалення стружки із зони обробки;
4. фрези;
5. обладнання для проведення вимірювань.

2.3.1 Фрезерні верстати

Із метою проведення дослідження, а саме для виконання операції фрезерування досліджуваного зразка використовуватимуться наступні фрезерні верстати: ГФ2171, оснащений системою ЧПК FMS-3200 (серії випробувань 1 і 2) і VMC850 (серії випробувань 3 і 4). В серіях випробувань 3 і 4 передбачені режими різання з яких не можуть бути виконаними на верстаті ГФ2171, саме через це виконана заміна верстата на модель VMC850 під час проведення цих двох серій іспитів. Для закріплення заготовки на столі фрезерного верстату використовується трикулачковий патрон. Рух подачі реалізовано через програму ЧПК за гвинтовою траєкторією. Приклад верстату із закріпленою заготовкою, підготовленою для проведення дослідження наведено на рисунку 2.7.

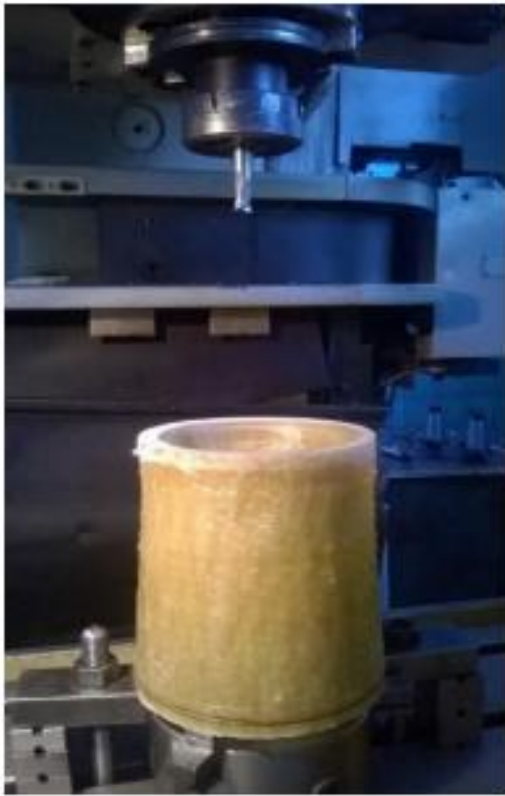


Рисунок 2.7 – Перед початком роботи: зліва ГФ2171; справа VMC850



Рисунок 2.8 - Верстат VMC850

Таблиця 2.3 - Технічні характеристики верстата VMC850

Система ЧПК	Mitsubishi M64M
Діапазон обертів, об	60-8000 (опція до 10000)
Діапазон подач X, Y/Z м/хв	10
Діапазон прискорених подач X, Y/Z м/хв	20
Потужність двигуна головного руху, кВт	7.5
Потужність двигуна подачі, кВт	3.5
Кількість інструмента, шт	24
Максимальний діаметр використовуваного інструменту, мм	100
Максимальна довжина інструменту, мм	250
Максимальна вага інструменту, кг	8

За написаною ЧПК програмою верстат фрезує торець заготовки точно по діаметру труби.



Рисунок 2.9 - Процес фрезерування зразка на верстаті ГФ 2171

2.3.2 Обладнання для проведення вимірювань

Для вимірювання шорсткості фрезерованої поверхні в ході роботи використовуватиметься профілограф-профілометр HOMMELTESTER W-55 із характеристиками, що наведені в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 - Технічні характеристики HOMMELTESTER W-55 [19].

Клас точності за DIN 4772	Клас 1
Вимірювальний діапазон/роздільність	±8 мкм/1 нм ±80 мкм/10 нм ±400 мкм/50 нм ±800 мкм/100 нм
Механізми подачі	LV16 – довжина траси 16 мм; waveline 20 – довжина траси 20 мм; waveline 60 – довжина траси 60 мм
Довжина трасування l_t	0.48; 1.5; 4.8; 15; 48 мм, або обирається в межах 0.1-120 мм, в залежності від механізму подачі
Відсічка кроку	0.08; 0.25; 0.8; 2.5; 8.0
Статистика	(n, x, S, R, max, min) для кожного з 1- 999 вимірювань
Живлення	100-240 В, 50-60 Гц, 160 ВА
Робоча температура	Від +10 °C до +45 °C, максимальна відносна вологість – 85%; $\Delta T = 2$ °C/год
Температура зберігання	Від -20 °C до +50 °C

Головні переваги цього приладу:

1. вимірювання майже будь яких параметрів шорсткості і хвилястості за існуючими стандартами;
2. наявність можливості задавати границі допусків для будь яких параметрів;
3. відображення кривої Еббота та інших типів профілів;
4. зручний, підготовлений для друку протокол вимірювання у форматі A4;
5. нескладне програмування приладу;
6. наявність функції статистики;
7. зручні функціональні кнопки та інтерфейс;

8. електронний доступ до результатів вимірювань;
9. наявність можливості експорту даних в Excel форматі.



Рисунок 2.10 - Процес вимірювання шорсткості РЕЗЕРОВАНОЇ поверхні за допомогою профілографа HOMMELTESTER W-55

В ході роботи буде використовуватись термометр KIRAY 300 з метою вимірювань температури в зоні різання.

Таблиця 2.5 - Технічні характеристики KIRAY 300.

Спектральна чутливість	8-14 мкм
Оптична роздільність	50:1 (50.8 мм при 2540 мм)
Діапазон вимірювання температур	Від -50 до +1850 °C
Похибка	Від -50 до +20 °C: ± 3 °C Від +20 до +500 °C: $\pm 1\% \pm 1$ °C Від +500 до +1000 °C: $\pm 1.5\%$ Від +1000 до +1850 °C: $\pm 2\%$
Інфрачервона стабільність	Від -50 до +20 °C: ± 1.5 °C Від +20 до +500 °C: $\pm 0.5\% \pm$ або 0.5 °C Від +500 до +1000 °C: $\pm 0.75\%$ Від +1000 до 1850 °C: ± 1
Точність вимірювань	0.1 °C
Час віддачі	150 мс
Коефіцієнт випромінювання	Регулюється від 0.1 до 1.0 (попереднє налаштування 0.95)
Подвійне лазерне наведення	Довжина хвилі: від 630 до 670 нм Вихід <1 мВт, клас 2



Рисунок 2.1 Термометр KIRAY 300

Параметр h зношування по задній поверхні фрези буде контролюватися за допомогою лупи Бринеллю. Приклад процесу контролю величини зношування по задній поверхні інструменти представлений на рисунку 2.12.

Зняття інструменту із цанги, тобто виймання фрези з патрону із метою більш зручного проведення вимірювання призводить до того, що виліт інструменту із шпинделю доведеться вимірювати наново, із деякою похибкою вимірювання. Через це за краще не знімати інструмент із патрону до кінця серії експериментів. Оскільки вимірювання зношування необхідно робити під час однієї серії експериментів, не залишається іншого вибору, окрім як знімати патрон цілком.

Для можливості робити цифрові знімки до лупи Бринеллю кріпиться спеціальна оправка. Враховуючи великі габарити патрону оправка додатково піднімається підкладанням опор під кожен лапку оправки. Інструмент

додатково підсвічується з метою досягнення кращої якості отриманих зображень.



Рисунок 2.12 - Процес вимірювання зносу по задній поверхні

На зображенні 2.13 наведено один із результатів проведених вимірювань. Збільшення лупи – 24х. Ціна поділки шкали – 0.05 мм.

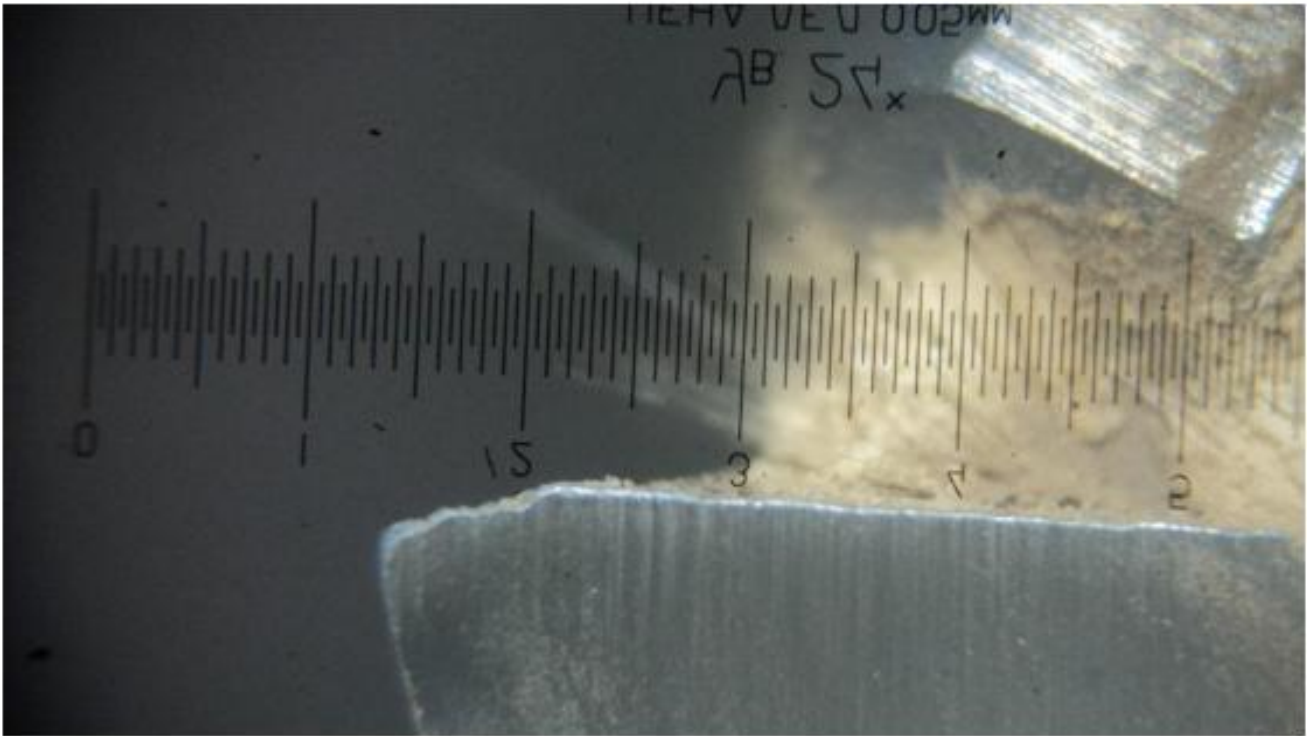


Рисунок 2.13 – Вимірювання зношування твердосплавної фрези за допомогою лупи

2.3.3 Фрези

Із метою вибору типу фрези, для використання під час проведення дослідження, були відібрані і проаналізовані наступні типи кінцевих фрез:

1. твердосплавні фрези за ГОСТ 18372-73 суцільної конструкції (рисунки 2.14 і 2.15). Матеріал, з якого виготовлені фрези – ВК8. Пропонується використовувати фрези діаметром 10 мм. Для аналізу із метою вибору були обрані комплекти фрез із двома типами геометрії, що відповідає виявленим в процесі огляду літератури рекомендаціям. Першому комплекту фрез відповідають наступні геометричні характеристики:

- кут нахилу канавок $\omega = 30^\circ$;
- кількість зубів фрези $z = 3$;
- задній кут $\alpha = 30^\circ$;
- передній кут $\gamma = 15^\circ$.

У другому випадку:

- $\omega = 35^\circ$;

- $z = 3$;
- $\alpha = 20^\circ$;
- $\gamma = 10^\circ$.



Рисунок 2.14 - Стандартні твердосплавні фрези (перший тип геометрії)



Рисунок 2.15 - Стандартні твердосплавні фрези (другий тип геометрії)

2. Другий тип інструменту, що запропоновано для використання в процесі дослідженні – фрези фірми Iscar. Ці фрези також розглядаються у двох

варіантах виконання геометрії інструменту із метою остаточного вибору інструменту.

Виконання 1.

Призначена для обробки таких композитних матеріалів, як склопластики, вуглепластики та ін. Кінцева фреза виконана із твердого сплаву, із кількістю зубів $z=10$, діаметром інструменту 10 мм. Геометричне виконання фрези по типу «кукурудза». Завдяки своїм геометричним характеристикам така фреза має забезпечувати високу продуктивність процесу фрезерування. Цей інструмент може здійснювати три типи обробки:

2.1 свердління

2.2 контурне фрезерування

2.3 обробка фасок.

Таблиця 2.6 – Заявлені виробником (Iscar) характеристики фрези «кукурудза»

Діаметр інструмента D , мм	Кількість зубів z	Довжина робочої частини L_p , мм	Довжина інструменту L , мм	Діаметр хвостовика d , мм	Подача на зуб S_z min	Подача на зуб S_z max
10	10	35	80	10	0.02	0.08

В якості матеріалу фрези використовується сплав ІСО 2 – твердий сплав із питомим вмістом кобальту 9% з ультра-дрібними зернами карбідів. Матеріал забезпечує досить непогану теплопровідність, що має підвищувати стійкість інструменту.



Рисунок 2.16 - Фреза фірми Iscar (варіант 1)



Рисунок 2.17 - Фреза фірми Iscar (варіант 1)

Другий варіант інструменту Iscar.

Другим типом інструменту від виробника Iscar, що було розглянуто для проведення дослідження, є чотиризуба кінцева фреза із твердого сплаву, також рекомендована виробником для обробки композитних матеріалів. Фреза має специфічну геометрію, що має сприяти обробці композитів. Діаметр інструменту 10 мм.

Таблиця 2.7 – Заявлені виробником характеристики, другий варіант фрез Iscar

Діаметр інструмента D , мм	Кількість зубів z	Довжина робочої частини L_p , мм	Довжина інструменту L , мм	Діаметр хвостовика d , мм	Подача на зуб S_z min	Подача на зуб S_z max
10	4	35	80	10	0.02	0.08

Матеріал фрези так само, твердий сплав ІСО 2.



Рисунок 2.18 - Фреза фірми Iscar (варіант 2)



Рисунок 2.19 - Фреза фірми Iscar (варіант 2)

В підсумку, було зроблено висновок, що кінцеві фрези за ГОСТ 18372-73 є типовими представниками кінцевих фрез, що є найбільш поширеними на будь якому виробництві. Ґрунтуючись на гіпотезі, що для фрез однакоого типу геометричного виконання, що відрізняються лише значеннями числових величин, що характеризують геометричні параметри (задній та передній кути α і γ , та ін.) можлива корекція результатів отриманих для одних значень параметрів множенням на коригуючий коефіцієнт, підібраний для фрези із іншими значеннями параметрів, було зроблено висновок що фрези за ГОСТ 18372-73 будуть більш привабливими у використанні під час проведення дослідження. Отже, було обрано фрезу за ГОСТ 18372-73 із другим типом геометрії ($\omega = 35^\circ$, $z = 3$; $\alpha = 20^\circ$; $\gamma = 10^\circ$) [20].

2.4 Методика подальшої обробки отриманих під час проведення експериментів даних

З метою подальшої обробки даних, що були отримані під час проведення експериментів, буде використовуватись система програмного забезпечення Excel. Головною метою цієї роботи є отримання емпіричних рівнянь:

$$h = A_1\tilde{+} B_1\tilde{\cdot} \tau; \quad (2.4)$$

$$T = A_2\tilde{+} B_2\tilde{\cdot} h; \quad (2.5)$$

$$Ra = A_3\tilde{+} B_3\tilde{\cdot} h; \quad (2.6)$$

$$T = A_4\tilde{+} B_4\tilde{\cdot} \tau; \quad (2.7)$$

$$Ra = A_5\tilde{+} B_5\tilde{\cdot} \tau; \quad (2.8)$$

В цих рівняннях τ це час роботи фрези (хв.), h – зношування фрези по задній поверхні (мм), $A_i\tilde{}$, $B_i\tilde{}$ – спеціальні емпіричні коефіцієнти, що пов'язані із технологічними параметрами фрезерування функціональною залежністю:

$$A_i\tilde{=} F_i(v, S, t); \quad (I)$$

$$B_i\tilde{=} G_i(v, S, t). \quad (II)$$

Для пошуку функцій $A_i\tilde{}$ і $B_i\tilde{}$ було розроблено спеціальну методику. Розроблена методика розрахована на пошук коефіцієнтів із лінійною залежністю від параметрів фрезерування.

Перш за все, за отриманими під час проведення експериментів даними проводиться побудова графіку, на основі якого відкладається лінійна залежність із метою апроксимації експериментальних даних (приклад на рис. 2.20).

Лінійна апроксимація виконується за методом найменших квадратів. Програмний засіб Excel надає можливості для простої і зручної побудови апроксимуючих кривих, зокрема і лінійних.

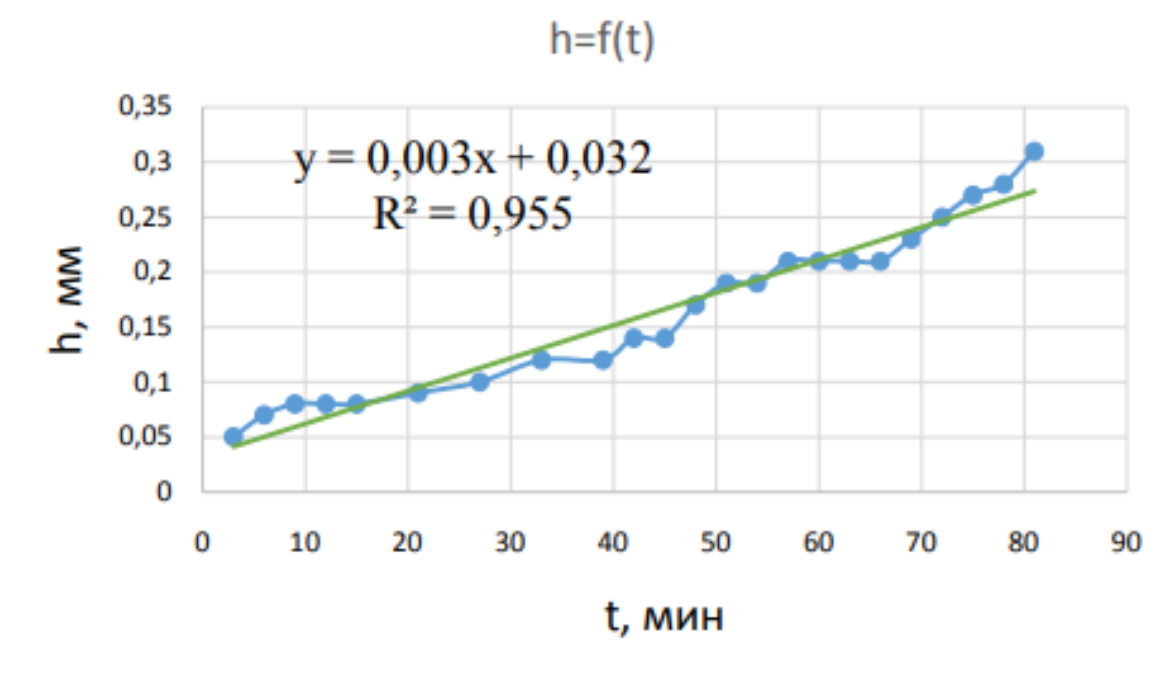


Рисунок 2.20 - Графік залежності зносу інструменту по задній поверхні від часу і лінійна апроксимуюча залежність при швидкості різання $V = 69$ м/хв, глибині різання $t = 10$ мм, подачі $F = 0,02$ мм/об

Наступним кроком є зведення таблиці що ґрунтується на даних матриці A планування експерименту. Також до таблиці вносяться коефіцієнти A_i і B_i , що є коефіцієнтами отриманих із метою апроксимації графіків, побудованих під час кожної серії експериментів для параметру що розглядається.

№ эксп.	V	S	t	A	B	A_{\sim}	a
1	69	0,02	10	0,0325	0,003	0,0325	-0,0451
2	69	0,1	1	-0,0148	0,0493	-0,0148	0,00022
3	200	0,1	10	0,0688	0,2064	0,0688	0,08813
4	200	0,02	1	0,0074	0,0178	0,0074	0,00604

Рисунок 2.21 - Загальний вигляд таблиці для визначення коефіцієнтів в емпіричній залежності

Наступним кроком до таблиці вноситься стовпчик a , що є стовпчиком лінійних коефіцієнтів для виконання розрахунків кінцевого коефіцієнту A_{\sim} емпіричного рівняння. Для цього виконується розрахунок оберненої матриці A^{-1} від матриці планування експерименту A . Все це легко робиться завдяки можливостям програмного середовища Excel.

Определение k -ов a				
A=	1	69	0,02	10
	1	69	0,1	1
	1	200	0,1	10
	1	200	0,02	1
A ⁽⁻¹⁾ =	0,8328	0,69391	-0,9439	0,4172
	-0,0038	-0,0038	0,00382	0,00382
	-6,25	6,25	6,25	-6,25
	0,05556	-0,0556	0,05556	-0,0556

Рисунок 2.22 - Розрахунок оберненої матриці A^{-1} в програмному середовищі Excel

Далі через матричне множення оберненої матриці A^{-1} на стовпчик A (не слід плутати з матрицею планування експерименту A , стовпчик A є стовпчиком коефіцієнтів A_i лінійних графіків) розраховується стовпчик a лінійної емпіричної залежності.

A=	1	69	0,02	10	A=	0,0325
	1	69	0,1	1		-0,0148
	1	200	0,1	10		0,0688
	1	200	0,02	1		0,0074
A ⁽⁻¹⁾ =	0,8328	0,69391	-0,9439	0,4172	a=	=MYMHO
	-0,0038	-0,0038	0,00382	0,00382		0,00022
	-6,25	6,25	6,25	-6,25		0,08813
	0,05556	-0,0556	0,05556	-0,0556		0,00604

Рисунок 2.23 - Розрахунок стовпчику a

СТАНДОТ...		✕ ✓ f_x		=H\$3+H\$4*B3+H\$5*C3+H\$6*D3						
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	$h=A+B(\tau)$									
2	№ эксп.	V	S	t	A	B	A~	a		
3	1	69	0,02	10	0,0325	0,003	=H\$3+H\$4*B3+H\$5*C3+H\$6*D3			
4	2	69	0,1	1	-0,0148	0,0493	-0,0148	0,00022		
5	3	200	0,1	10	0,0688	0,2064	0,0688	0,08813		
6	4	200	0,02	1	0,0074	0,0178	0,0074	0,00604		
7							S=	7,5E-35		

Рисунок 2.24 - Розрахунок A_i^{\sim}

І нарешті, множенням стовпчику **a** на строку $x = (1, v, S, t)$ отримується значення $A_i^{\sim} = x \cdot a$ (рис. 2.24).

Як результат ми матимемо емпіричну лінійну залежність (рис. 2.25):

a=	-0,04506	$h=A+B(\tau)$			
	0,00022	где			
	0,08813	$A=-0,04506+V*0,000223+S*0,088125+t*0,006039$			
	0,00604	$B=-0,15069+V*0,000656+S*1,468125+t*0,007906$			

Рисунок 2.25 - Процес формування емпіричної залежності з отриманими значеннями для коефіцієнта A_i^{\sim}

Коефіцієнт B_i^{\sim} бажаної емпіричної залежності розраховується в той самий метод. Приклад наведено для розрахунку коефіцієнтів A_1^{\sim} для емпіричної залежності 2.4. Коефіцієнти для всіх інших емпіричних рівнянь відшукуються в той самий спосіб. Результати всіх розрахунків представлені в третьому розділі цієї роботи.

2.5 Висновки до розділу

З метою проведення дослідження було обрано матеріал для обробки – склопластикова труба за ГОСТ Р 53201-2008 і були підготовлені заготовки для проведення серій експериментів із фрезерування (рис. 2.2). Також, із метою дослідження на електронному мікроскопі були заготовлені спеціальні зразки матеріалу. Проте, на жаль, за отриманими знімками, через низьку якість матеріалу заготовки не вдалося провести оцінку глибини дефектного шару після фрезерування. За отриманими зображеннями з електронного мікроскопу було проведено розрахунки діаметру скляних волокон. Ці дані будуть використані при побудові кінцево-елементної моделі в програмному середовищі ANSYS.

Було проведено огляд літератури із метою виявлення рекомендацій щодо призначення режимів різання під час обробки склопластиків фрезеруванням. Були виявлені інтервали для кожного з параметрів, в межах яких були прийняті значення для проведення експериментів (табл. 2.1). Дослідження проводяться на базі дробового факторного експерименту.

Експерименти запропоновано проводити на фрезерних металорізальних верстатах із числовим програмним керуванням ГФ2171 і VMC850, із відповідним оснащенням. В ході роботи було обрано ріжучий інструмент: твердосплавні кінцеві фрези за ГОСТ 18372-73 і спеціальні твердосплавні фрези від Iscar, рекомендовані виробником для обробки композитних матеріалів.

Проведений огляд математичної літератури [21, 22] із метою розробки методики математичної обробки експериментальних даних із метою отримання емпіричних рівнянь лінійного характеру для практичних розрахунків параметрів фрезерування.

3 Дослідження процесу фрезерування склопластику із метою виявлення зв'язку між режимами різання та параметрами обробленої поверхні

3.1 Виявлення впливу режимів різання під час фрезерування склопластику на зношування по задній поверхні фрези

З метою проведення дослідження відповідно до матриці планування експерименту були виконані чотири серії експериментів (табл. 2.1).

Таблиця 3.1 - Дані отримані для серії експериментів №1 (швидкість різання $V = 69\text{м/хв}$, глибина різання $t = 10\text{мм}$, подача $F = 0,02\text{ мм/об}$)

№ витка	Час роботи τ , хв	Температура T , °C	Зношування ріжучих кромок h , мм	Ra стандартне відхилення	Ra середнє
1	3	32	0.05	0.130622441	2.092
2	6	37	0.07	0.272393492	3.006
3	9	39	0.08	0.249399278	2.285
4	12	44	0.08	0.38803304	2.876
5	15	46	0.08	0.200637377	2.806
6, 7	21	65	0.09	0.715211008	4.349
8, 9	27	69	0.1	0.838801394	4.831
10, 11	33	75	0.12	0.620523972	5.577
12, 13	39	83	0.12	0.592942621	5.679
14, 15	42	89	0.14	0.610398777	5.503
16, 17	45	95	0.14	0.548139277	5.162
18, 19	48	98	0.17	0.676601803	5.495
20, 21	51	112	0.19	0.676601803	5.495
22, 23	54	123	0.19	0.710307445	5.758
24, 25	57	130	0.21	0.745128624	5.948
26, 27	60	136	0.21	0.745128624	5.948
28, 29	63	140	0.21	0.745128624	5.948
30, 31	66	162	0.21	0.745128624	5.948
32, 33	69	190	0.23	0.777997429	6.046
34, 35	72	230	0.25	0.919880945	5.949
36, 37	75	260	0.27	0.935813881	6.269
38, 39	78	285	0.28	1.167191787	6.492
40, 41	81	312	0.31	1.167243191	7.042
К кореляції для h				0.87180001	0.8667303
К кореляції для t				0.877150104	0.928647

Всі результати вимірювань, виконаних під час проведення експериментів були занесені до відповідних таблиць. Масив даних, отриманих під час проведення експериментів сформовано у таблиці 3.1-3.4. Далі ці дані були опрацьовані засобами програми Excel.

Таблиця 3.2 - Дані отримані для серії експериментів №2 (швидкість різання $V = 69\text{м/хв}$, глибина різання $t = 1\text{мм}$, подача $F = 0,1\text{ мм/об}$)

№ витка	Час роботи τ , хв	Температура T , °C	Зношування ріжучих кромek h , мм	Ra стандартне відхилення	Ra середнє
1	0.6	49	0.05	0.0646357	2.22
2	1.2	52	0.05	0.0359784	2.385
3	1.8	67	0.06	0.0607728	2.454
4, 5	3	87	0.09	0.0416867	2.214
6, 7	4.2	94	0.1	0.0250998	2.346
8, 9, 10	6	108	0.32	0.3533836	2.694
К кореляції для h				0.95697	0.810823
К кореляції для t				0.710908	0.660706

Таблиця 3.3 - Дані отримані для серії експериментів №3 (швидкість різання $V = 200\text{м/хв}$, глибина різання $t = 10\text{мм}$, подача $F = 0,1\text{ мм/об}$)

№ витка	Час роботи τ , хв	Температура T , °C	Зношування ріжучих кромek h , мм	Ra стандартне відхилення	Ra середнє
1	0.207	200	0.1	0.151393527	5.55
2	0.414	220	0.14	1.13121616	5.7
3	0.62	260	0.2	0.152249795	7.134
4, 5	1.035	285	0.28	1.515146858	7.698
6, 7	1.448	305	0.33	0.15453155	7.55
К кореляції для h				0.108952422	0.92814583
К кореляції для t				0.055712315	0.87024930

Таблиця 3.4 - Дані отримані для серії експериментів №4 (швидкість різання $V = 200\text{м/хв}$, глибина різання $t = 1\text{мм}$, подача $F = 0,02\text{ мм/об}$)

№ витка	Час роботи τ , хв	Температура T , °C	Зношування ріжучих кромок h , мм	Ra стандартне відхилення	Ra середнє
1	1.035	68	0.02	0.052630789	2.022
2	2.07	71	0.05	0.118827606	2.348
3	3.105	78	0.07	0.071902712	3.422
4, 5	5.175	95	0.1	0.065192024	2.84
6, 7	7.245	98	0.11	0.066858059	3.362
8, 9	9.315	102	0.15	0.147580487	2.806
10, 11	11.385	103	0.21	0.306300506	2.678
12-14	14.49	106	0.27	0.482161799	4.526
15-17	17.595	110	0.3	0.315843542	2.478
К кореляції для h				0.886387641	0.39904456
К кореляції для t				0.837602975	0.42103537

Згідно з обраною методикою, отримані під час проведення експериментів дані були використані для побудови в програмному засобі Excel графіків: графіки по точках і прямі, з метою лінійної апроксимації методом найменших квадратів.

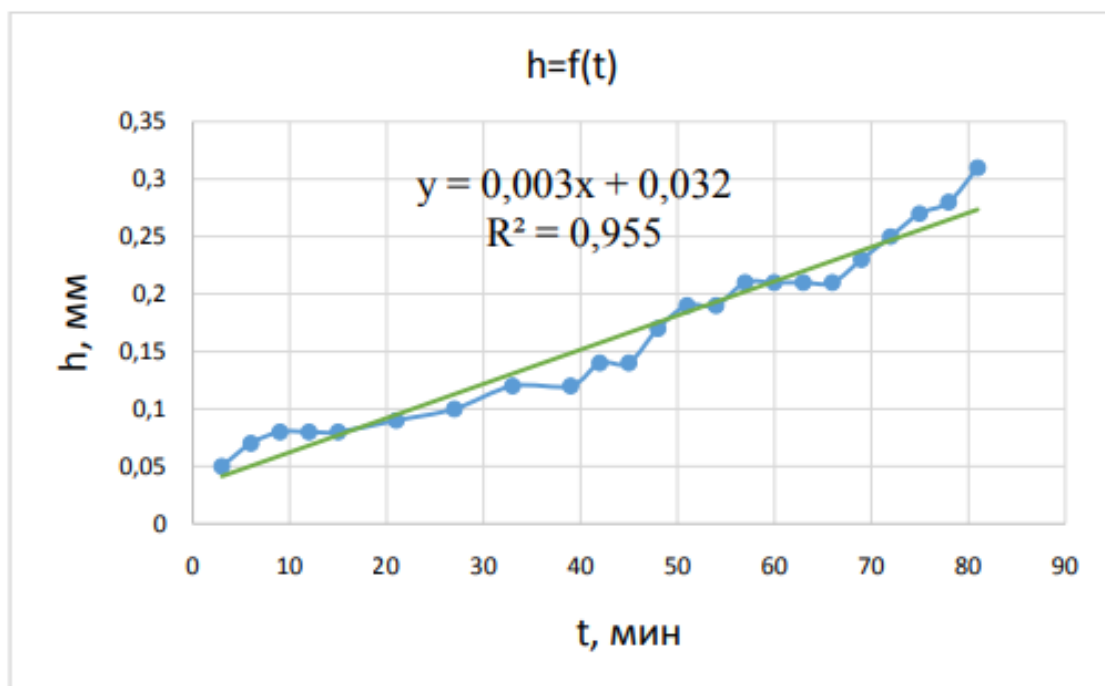


Рисунок 3.1 - Графік функції зношування фрези по задній поверхні від часу при швидкості різання $V = 69\text{м/хв}$, глибині різання $t = 10\text{мм}$, подачі $F = 0,02\text{ мм/об}$

Значення коефіцієнтів отриманих лінійних залежностей були занесені до таблиць і використані під час виведення лінійних емпіричних рівнянь для розрахунку параметрів процесу фрезерування склопластиків.

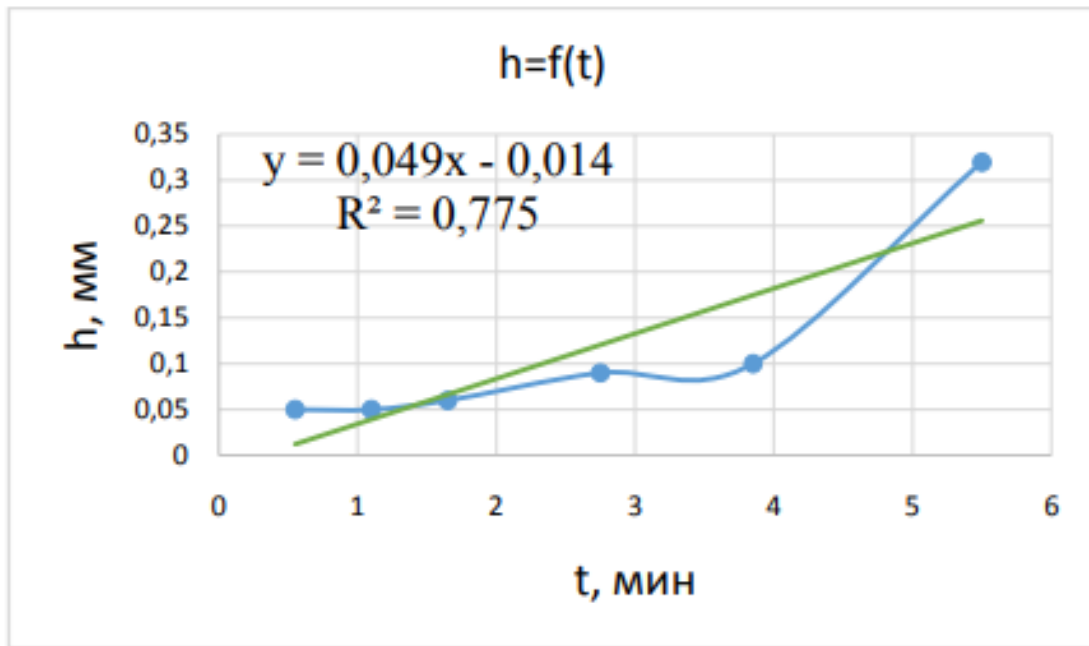


Рисунок 3.2 - Графік функції зношування фрези по задній поверхні від часу при швидкості різання $V = 69 \text{ м/хв}$, глибині різання $t = 1 \text{ мм}$, швидкості подачі $F = 0,1 \text{ мм/об}$

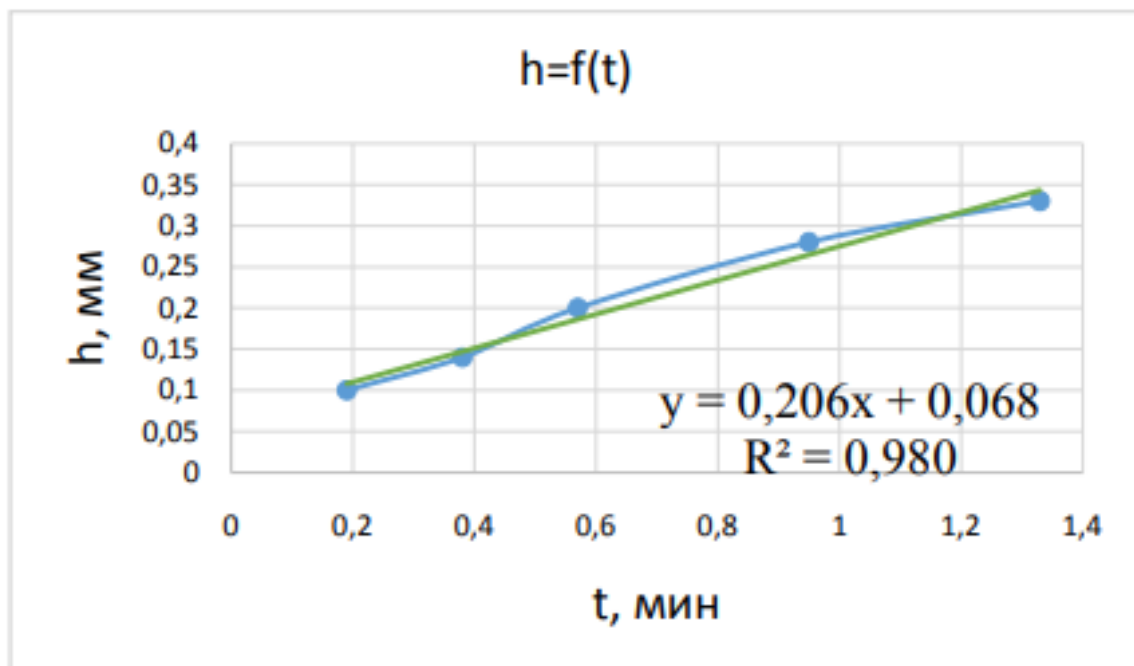


Рисунок 3.3 - Графік функції зношування фрези по задній поверхні від часу при $V = 200 \text{ м/хв}$, $t = 10 \text{ мм}$, $F = 0,1 \text{ мм/об}$

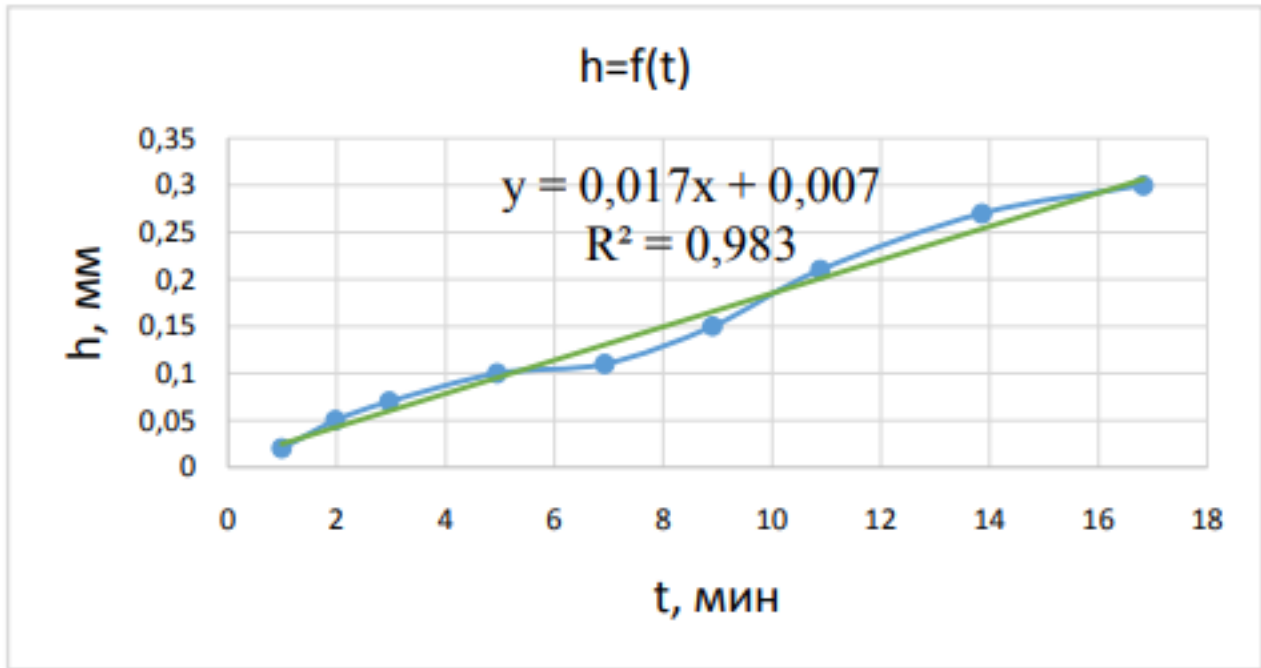


Рисунок 3.4 - Графік функції зношування фрези по задній поверхні від часу при $V = 200 \text{ м/хв}$, $t = 1 \text{ мм}$, $F = 0,02 \text{ мм/об}$

№ эксп.	V	S	t	A	B	A~	a
1	69	0,02	10	0,0325	0,003	0,0325	-0,0451
2	69	0,1	1	-0,0148	0,0493	-0,0148	0,00022
3	200	0,1	10	0,0688	0,2064	0,0688	0,08813
4	200	0,02	1	0,0074	0,0178	0,0074	0,00604
						S=	2,4E-34
Определение k-ов σ							
A=	1	69	0,02	10	B=	0,0325	
	1	69	0,1	1		-0,0148	
	1	200	0,1	10		0,0688	
	1	200	0,02	1		0,0074	
A^(-1)=	0,8328	0,69391	-0,9439	0,4172		-0,0451	
	-0,0038	-0,0038	0,00382	0,00382		0,00022	
	-6,25	6,25	6,25	-6,25		0,08813	
	0,05556	-0,0556	0,05556	-0,0556		0,00604	

Рисунок 3.5 - Розрахунок коефіцієнту A_1 рівняння $h = A_1 + B_1 \cdot \tau$

№ эксп.	V	S	t	A	B	B~	b
1	69	0,02	10	0,0325	0,003	0,003	-0,1507
2	69	0,1	1	-0,0148	0,0493	0,0493	0,00066
3	200	0,1	10	0,0688	0,2064	0,2064	1,46813
4	200	0,02	1	0,0074	0,0178	0,0178	0,00791
S=							2,5E-33
Определение k -ов b							
B=	1	69	0,02	10	B=	0,003	
	1	69	0,1	1		0,0493	
	1	200	0,1	10		0,2064	
	1	200	0,02	1		0,0178	
A^(-1)=	0,8328	0,69391	-0,9439	0,4172		-0,1507	
	-0,0038	-0,0038	0,00382	0,00382		0,00066	
	-6,25	6,25	6,25	-6,25		1,46813	
	0,05556	-0,0556	0,05556	-0,0556		0,00791	

Рисунок 3.6 - Розрахунок коефіцієнту B_1^{\sim} рівняння $h = A_1^{\sim} + B_1^{\sim} \cdot \tau$

В результаті проведених розрахунків було отримано рівняння, що має вигляд:

$$h = A_1^{\sim} + B_1^{\sim} \cdot \tau; \quad (3.1)$$

$$\text{де } A_1^{\sim} = -0.04506 + 0.000223 \cdot v + 0.088125 \cdot S + 0.006039 \cdot t$$

$$B_1^{\sim} = -0.15069 + 0.000656 \cdot v + 1.468125 \cdot S + 0.007906 \cdot t$$

3.2 Виявлення впливу режимів різання під час фрезерування склопластику на шорсткість обробленої поверхні

Для параметру шорсткості, як і для параметру температури в зоні різання буде проведено пошук двох емпіричних рівнянь: функцію від часу (τ), і функцію від зносу по задній поверхні фрези (h).

За таблицями 3.1-3.4 було побудовано відповідні графіки (рисунки 3.7-3.9)

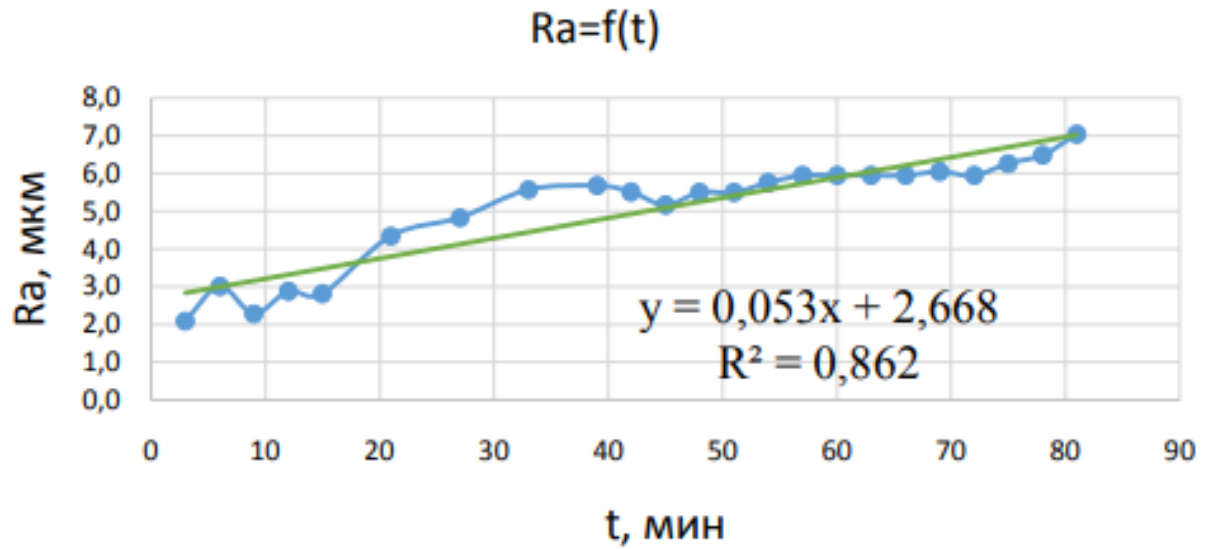


Рисунок 3.7 - Графік функції шорсткості обробленої поверхні від часу при $V = 69 \text{ м/хв}$, $t = 10 \text{ мм}$, $F = 0,02 \text{ мм/об}$

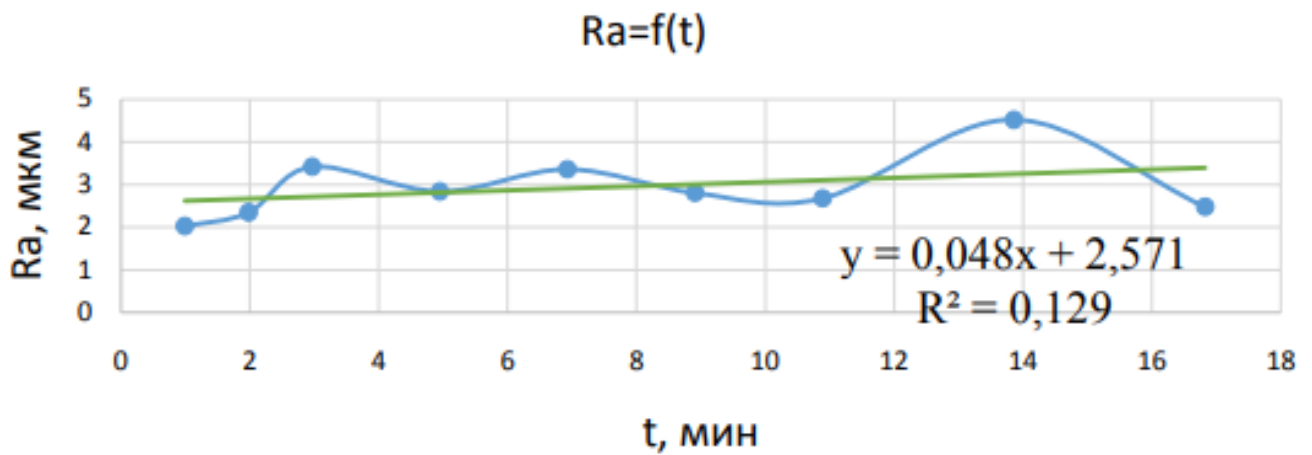


Рисунок 3.8 - Графік функції шорсткості обробленої поверхні від часу при $V = 200 \text{ м/хв}$, $t = 1 \text{ мм}$, $F = 0,02 \text{ мм/об}$.

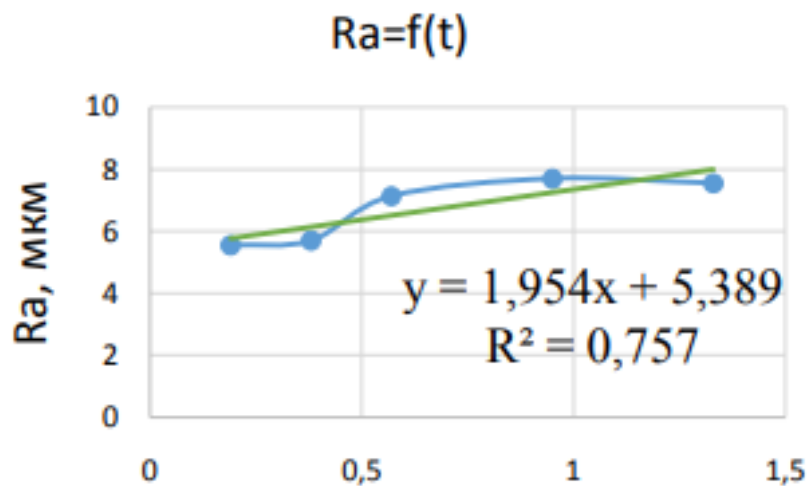
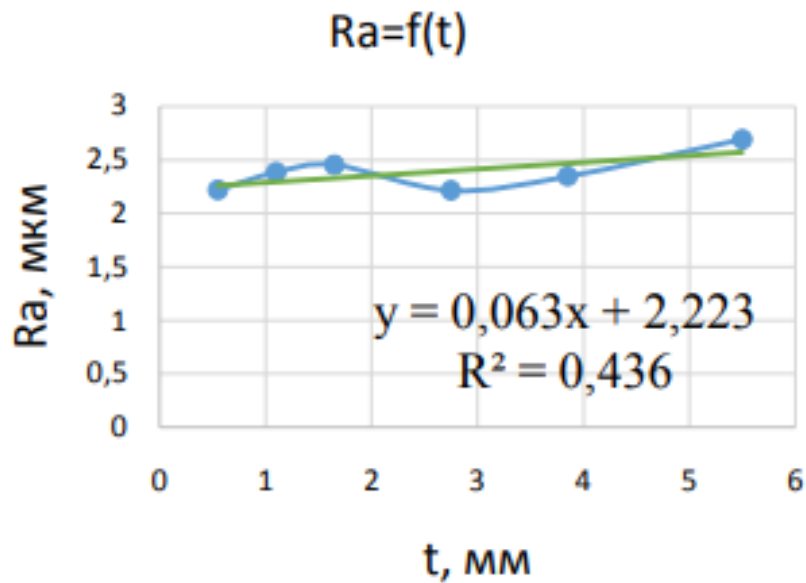


Рисунок 3.9 - Графік функції шорсткості обробленої поверхні від часу: зверху – $V = 69\text{м/хв}$, $t = 1\text{мм}$, $F = 0,1\text{ мм/об}$; знизу – $V = 200\text{м/хв}$, $t = 10\text{мм}$, $F = 0,1\text{ мм/об}$

На рисунку 3.10 представлений процес розрахунку коефіцієнтів лінійного емпіричного рівняння відповідно до алгоритму, представленою в пункті 2.5. Отриманий математичний вираз є функцією шорсткості обробленої поверхні від часу обробки.

№ эксп.	V	S	t	A	B	A~	a
1	69	0,02	10	2,6685	0,0537	2,6685	-0,24884
2	69	0,1	1	2,2235	0,0631	2,2235	0,011714
3	200	0,1	10	5,3893	1,9548	5,3893	14,82813
4	200	0,02	1	2,5718	0,0488	2,5718	0,18125
							S= 9,86E-31
Определение k-ов a							
A=	1	69	0,02	10			2,6685
	1	69	0,1	1	A~=		2,2235
	1	200	0,1	10			5,3893
	1	200	0,02	1			2,5718
A^(-1)=	0,832803	0,693914	-0,94391	0,417197			-0,24884
	-0,00382	-0,00382	0,003817	0,003817			0,011714
	-6,25	6,25	6,25	-6,25			14,82813
	0,055556	-0,05556	0,055556	-0,05556			0,18125
№ эксп.	V	S	t	A	B	B~	b
1	69	0,02	10	2,6685	0,0537	0,0537	-1,7363
2	69	0,1	1	2,2235	0,0631	0,0631	0,007202
3	200	0,1	10	5,3893	1,9548	1,9548	11,97125
4	200	0,02	1	2,5718	0,0488	0,0488	0,105367
							S= 6,38E-32
Определение k-ов b							
B=	1	69	0,02	10			0,0537
	1	69	0,1	1	B=		0,0631
	1	200	0,1	10			1,9548
	1	200	0,02	1			0,0488
A^(-1)=	0,832803	0,693914	-0,94391	0,417197			-1,7363
	-0,00382	-0,00382	0,003817	0,003817			0,007202
	-6,25	6,25	6,25	-6,25			11,97125
	0,055556	-0,05556	0,055556	-0,05556			0,105367

Рисунок 3.10 - Розрахунок коефіцієнтів A_2^{\sim} і B_2^{\sim} рівняння $Ra = A_2^{\sim} + B_2^{\sim} \cdot \tau$

В результаті отримане рівняння, що виражає залежність шорсткості обробленої поверхні від часу має вигляд:

$$Ra = A_2^{\sim} + B_2^{\sim} \cdot \tau; \quad (3.2)$$

$$\text{де } A_2^{\sim} = -0.24 + 0.011714 \cdot v + 14.82813 \cdot S + 0.18125 \cdot t$$

$$B_2^{\sim} = -1.7363 + 0.007202 \cdot v + 11.9712 \cdot S + 0.105367 \cdot t$$

Наступним кроком на основі таблиць 3.1-3.4 будуюмо графіки для отримання емпіричного рівняння $Ra = A_3^{\sim} + B_3^{\sim} \cdot h$:

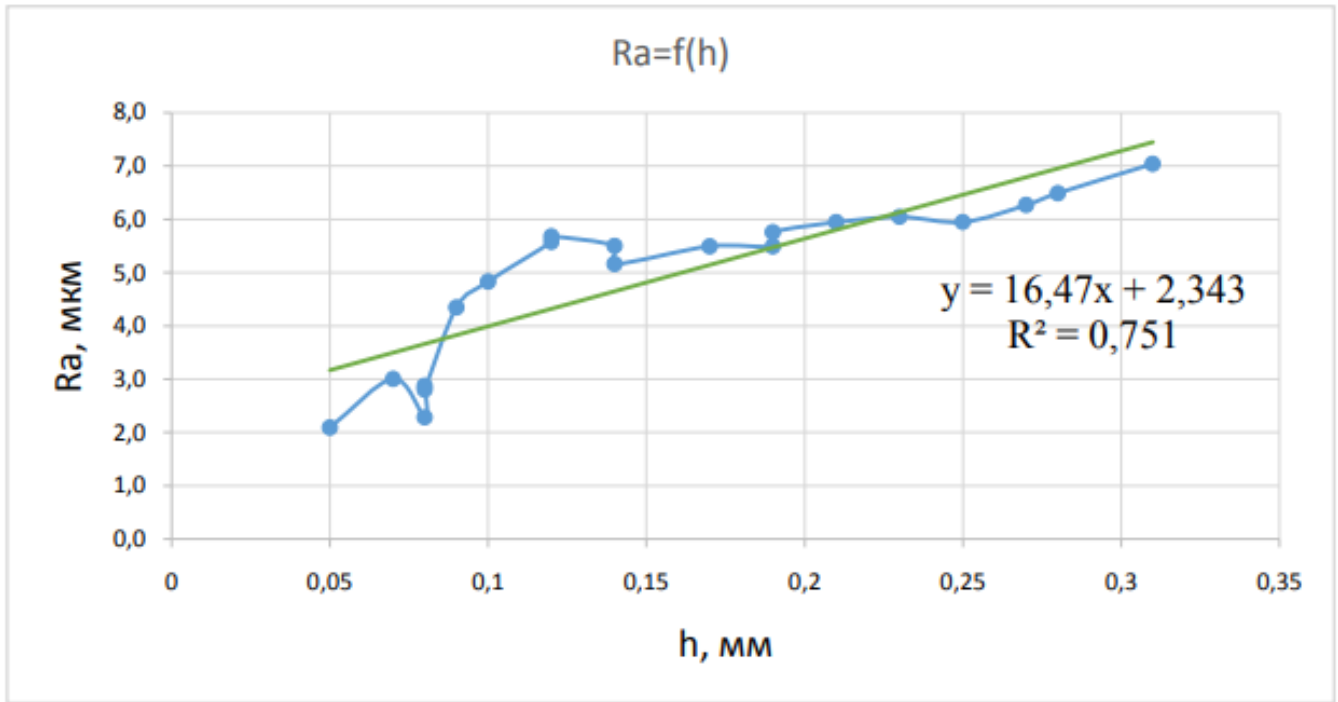


Рисунок 3.11 - Графік функції шорсткості обробленої поверхні від параметру стійкості фрези при $V = 69 m/min$, $t = 10 mm$, $F = 0.02 mm/об$

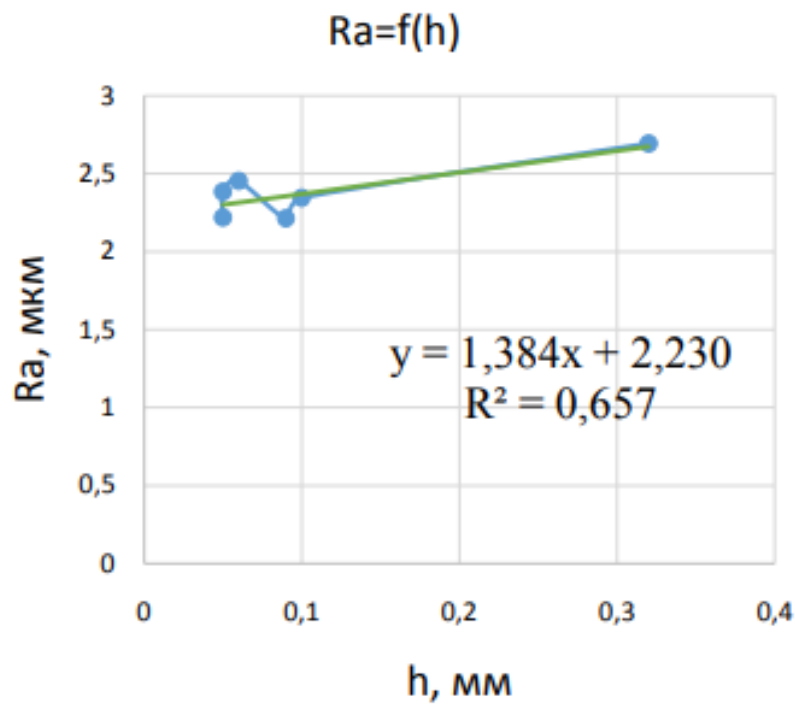


Рисунок 3.12 - Графік функції шорсткості обробленої поверхні від параметру стійкості фрези при $V = 69 m/min$, $t = 1 mm$, $F = 0.1 mm/об$.

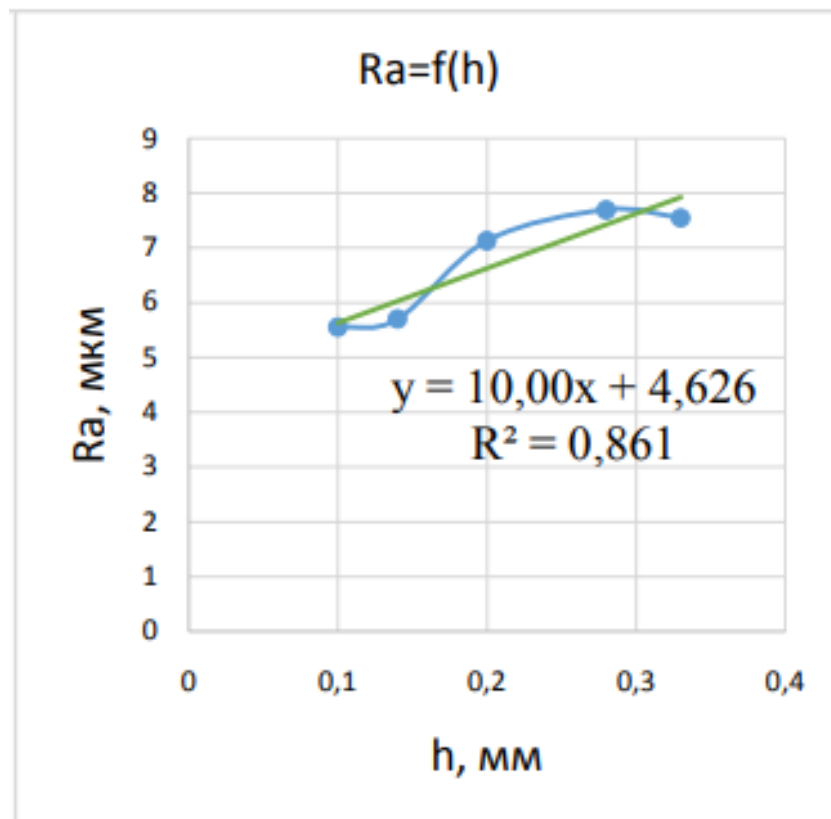


Рисунок 3.13 - Графік функції шорсткості обробленої поверхні від параметру стійкості фрези при $V = 200 \text{ м/хв}$, $t = 10 \text{ мм}$, $F = 0,1 \text{ мм/об}$

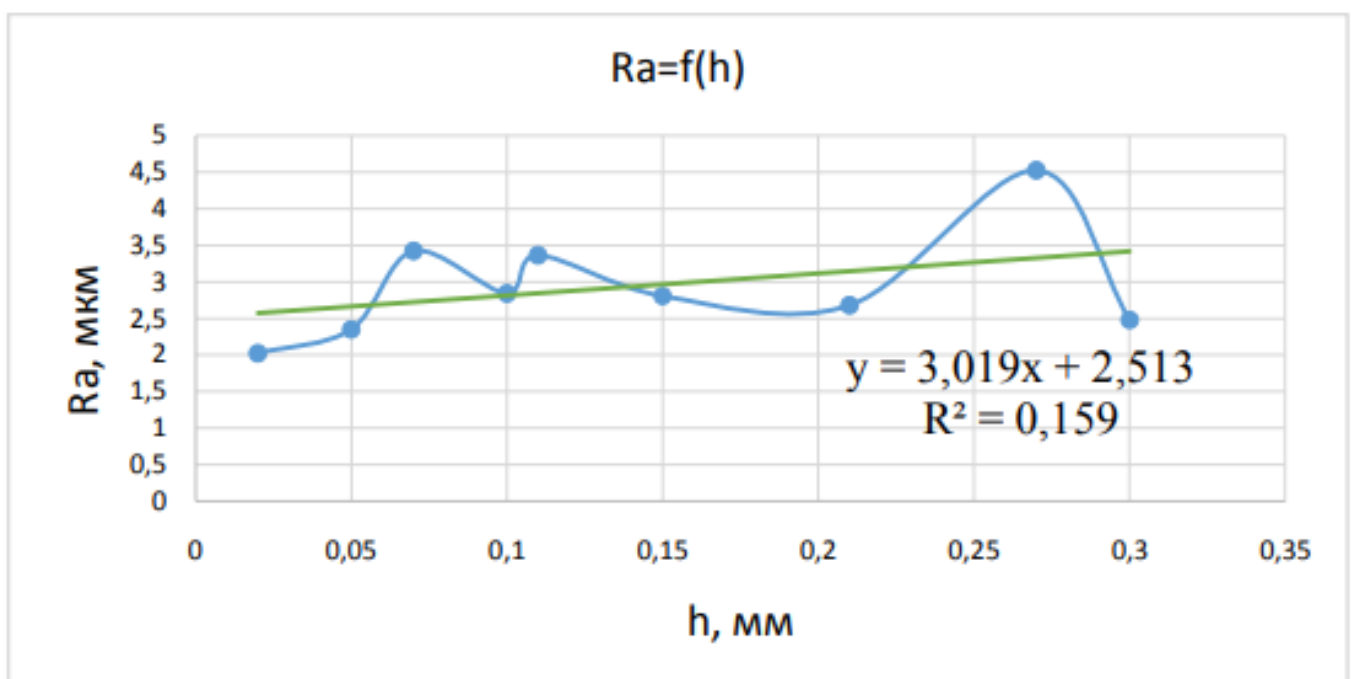


Рисунок 3.14 - Графік функції шорсткості обробленої поверхні від параметру стійкості фрези при швидкості різання $V = 200 \text{ м/хв}$, глибині різання $t = 1 \text{ мм}$, швидкості подачі $F = 0,02 \text{ мм/об}$

№ эксл.	V	S	t	A	B	A~	a
1	69	0,02	10	2,3439	16,427	2,3439	0,181646
2	69	0,1	1	2,2309	1,3843	2,2309	0,009788
3	200	0,1	10	4,6263	10,001	4,6263	12,50188
4	200	0,02	1	2,513	3,0194	2,513	0,123683
							S= 3,16E-30
Определение k-ов a							
A=	1	69	0,02	10		2,3439	
	1	69	0,1	1		2,2309	
	1	200	0,1	10		4,6263	
	1	200	0,02	1		2,513	
A^(-1)=	0,832803	0,693914	-0,94391	0,417197		0,181646	
	-0,00382	-0,00382	0,003817	0,003817		0,009788	
	-6,25	6,25	6,25	-6,25		12,50188	
	0,055556	-0,05556	0,055556	-0,05556		0,123683	

№ эксл.	V	S	t	A	B	B~	b
1	69	0,02	10	2,3439	16,427	16,427	6,460641
2	69	0,1	1	2,2309	1,3843	1,3843	-0,01829
3	200	0,1	10	4,6263	10,001	10,001	-50,3819
4	200	0,02	1	2,513	3,0194	3,0194	1,223572
							S= 5,18E-30
Определение k-ов b							
B=	1	69	0,02	10		16,427	
	1	69	0,1	1		1,3843	
	1	200	0,1	10		10,001	
	1	200	0,02	1		3,0194	
A^(-1)=	0,832803	0,693914	-0,94391	0,417197		6,460641	
	-0,00382	-0,00382	0,003817	0,003817		-0,01829	
	-6,25	6,25	6,25	-6,25		-50,3819	
	0,055556	-0,05556	0,055556	-0,05556		1,223572	

Рисунок 3.15 - Розрахунок коефіцієнтів A_3 і B_3 рівняння $Ra = A_3 + B_3 \cdot h$

В підсумку було отримано функцію шорсткості від критерію стійкості фрези (зношування по задній поверхні h), що є емпіричним математичним лінійним виразом:

$$Ra = A_3 + B_3 \cdot h; \quad (3.3)$$

$$\text{де } A_3 = 0.181646 + 0.009788 \cdot v + 12.501188 \cdot S + 0.123683 \cdot t$$

$$B_3 = 6.46 - 0.01829 \cdot v - 50.3819 \cdot S + 1.223572 \cdot t$$

3.3 Виявлення впливу режимів різання під час фрезерування склопластику на температуру в зоні різання

Так само, як і у випадку із шорсткістю, будуть виявлені функціональні залежності від часу і від критерію стійкості фрези. Для функції часу на основі таблиць 3.1-3.4 маємо:

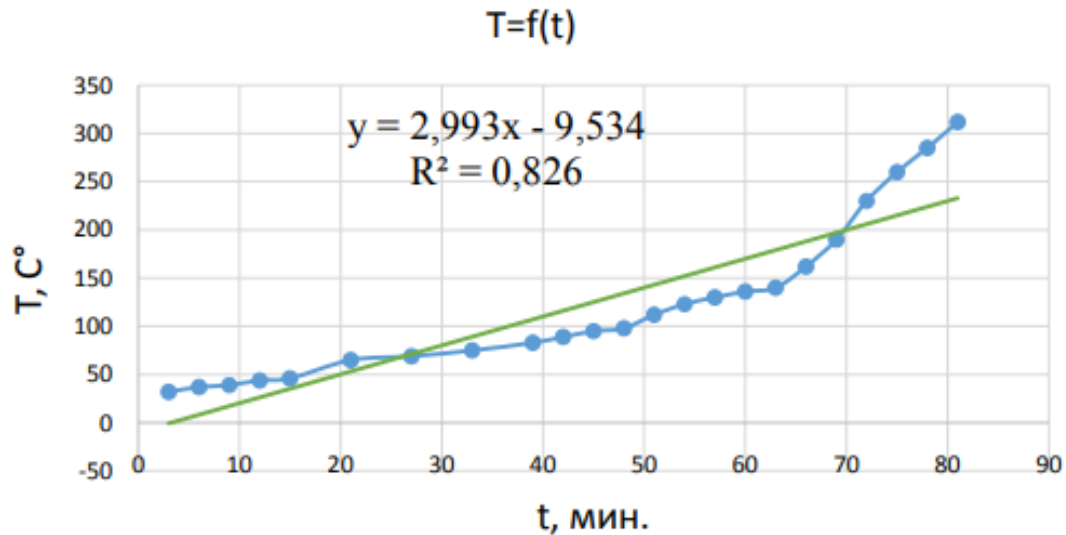


Рисунок 3.16 - Графік функції температури в зоні різання від часу при $V = 69 \text{ м/хв}$, $t = 10 \text{ мм}$, $F = 0,02 \text{ мм/об}$

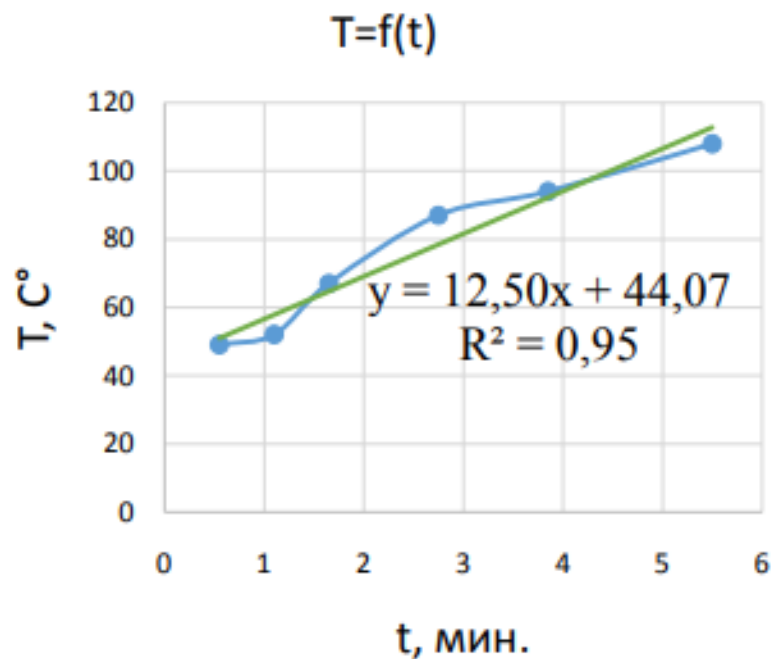


Рисунок 3.17 - Графік функції температури в зоні різання від часу при $V = 69 \text{ м/хв}$, $t = 1 \text{ мм}$, $F = 0,1 \text{ мм/об}$

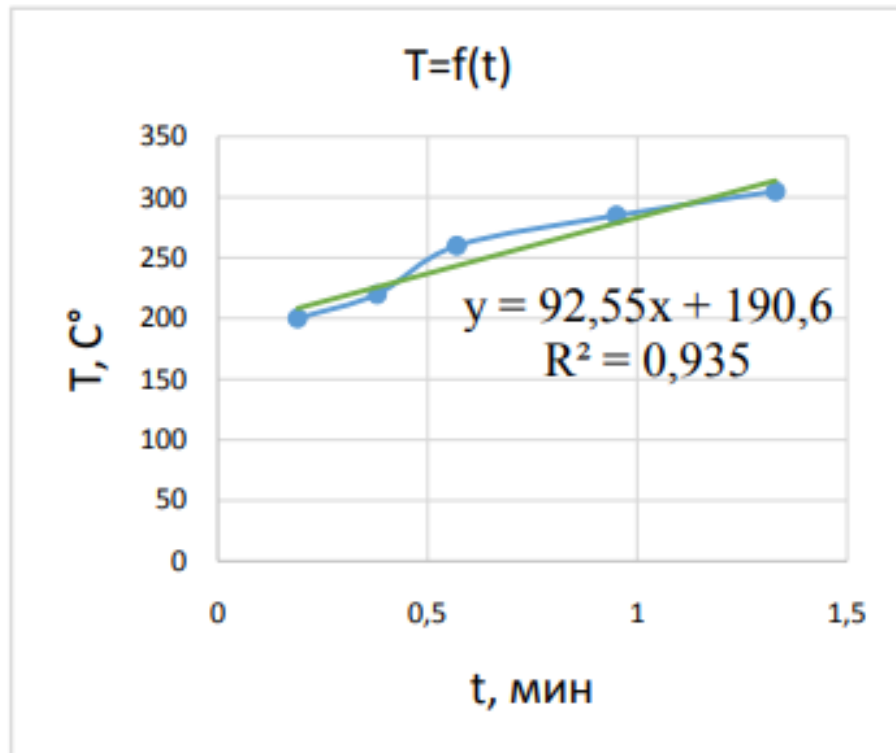


Рисунок 3.18 - Графік функції температури в зоні різання від часу: $V = 200 \text{ м/хв}$, $t = 10 \text{ мм}$, $F = 0,1 \text{ мм/об}$

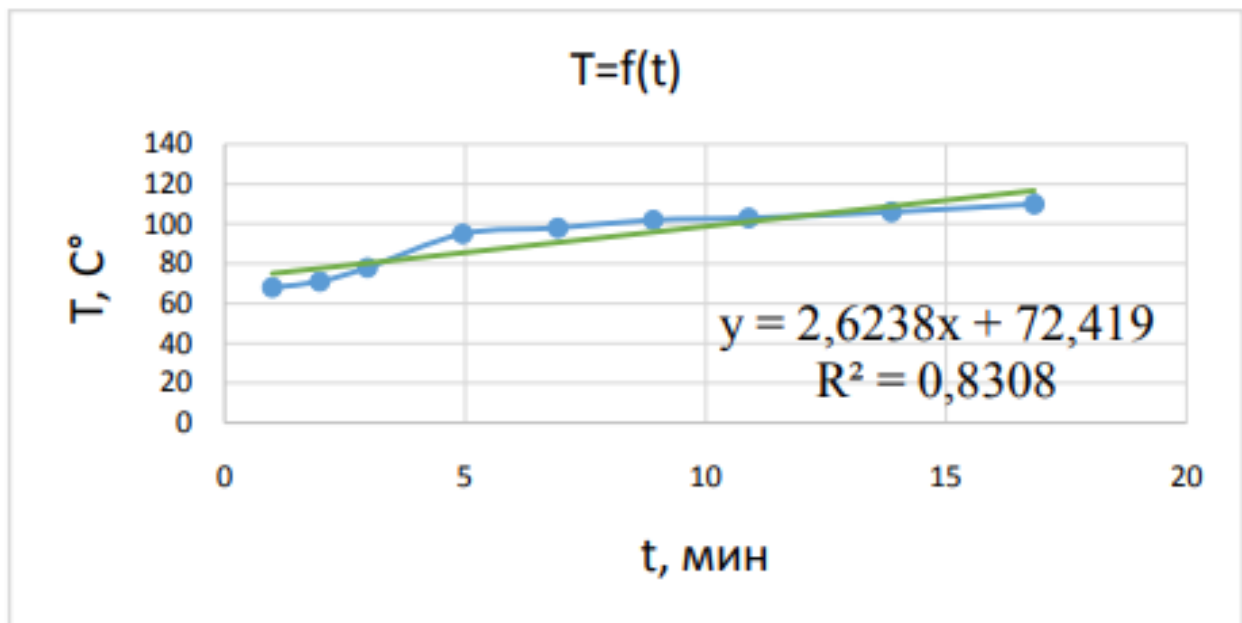


Рисунок 3.19 - Графік функції температури в зоні різання від часу при швидкості різання $V = 200 \text{ м/хв}$, глибині різання $t = 1 \text{ мм}$, швидкості подачі $F = 0,02 \text{ мм/об}$

№ эксп.	V	S	t	A	B	A~	a
1	69	0,02	10	-9,534	2,9935	-9,534	-127,141
2	69	0,1	1	44,07	12,505	44,07	0,872416
3	200	0,1	10	190,69	92,559	190,69	1074,219
4	200	0,02	1	72,419	2,6238	72,419	3,592611
						S=	5,36E-29
Определение k-ов a							
A=	1	69	0,02	10	A~=	-9,534	
	1	69	0,1	1		44,07	
	1	200	0,1	10		190,69	
	1	200	0,02	1		72,419	
A^(-1)=	0,832803	0,693914	-0,94391	0,417197		-127,141	
	-0,00382	-0,00382	0,003817	0,003817		0,872416	
	-6,25	6,25	6,25	-6,25		1074,219	
	0,055556	-0,05556	0,055556	-0,05556		3,592611	

Рисунок 3.17.1 - Розрахунок коефіцієнту рівняння $T = A_4 + B_4 \cdot \tau$

№ эксп.	V	S	t	A	B	B~	b	
1	69	0,02	10	-9,534	2,9935	2,9935	-75,1027	
2	69	0,1	1	44,07	12,505	12,505	0,304139	
3	200	0,1	10	190,69	92,559	92,559	621,5419	
4	200	0,02	1	72,419	2,6238	2,6238	4,467983	
							S= 1,94E-28	
Определение k-ов b								
B=	1	69	0,02	10	B~	2,9935		
	1	69	0,1	1		12,505		
	1	200	0,1	10		92,559		
	1	200	0,02	1		2,6238		
A^(-1)=	0,832803	0,693914	-0,94391	0,417197				-75,1027
	-0,00382	-0,00382	0,003817	0,003817				0,304139
	-6,25	6,25	6,25	-6,25				621,5419
	0,055556	-0,05556	0,055556	-0,05556				4,467983

Рисунок 3.20 - Розрахунок коефіцієнтів A_4 і B_4 рівняння $T = A_4 + B_4 \cdot \tau$

Отримана в підсумку лінійна емпірична функціональна залежність температури в зоні різання під час фрезерування склопластику від часу має наступний вигляд:

$$T = A_4 + B_4 \cdot \tau; \quad (3.1)$$

$$\text{де } A_4 = -127.141 + 0.872416 \cdot v + 1074.219 \cdot S + 3.5926 \cdot t$$

$$B_4 = -75.1027 + 0.304139 \cdot v + 621.5419 \cdot S + 4.467983 \cdot t$$

Нарешті, виведення емпіричного рівняння $T = A_5 + B_5 \cdot h$ відбувається за відпрацьованою методикою.

Були виконані побудови графіків із апроксимуючими прямими по таблицям 3.1-3.4.

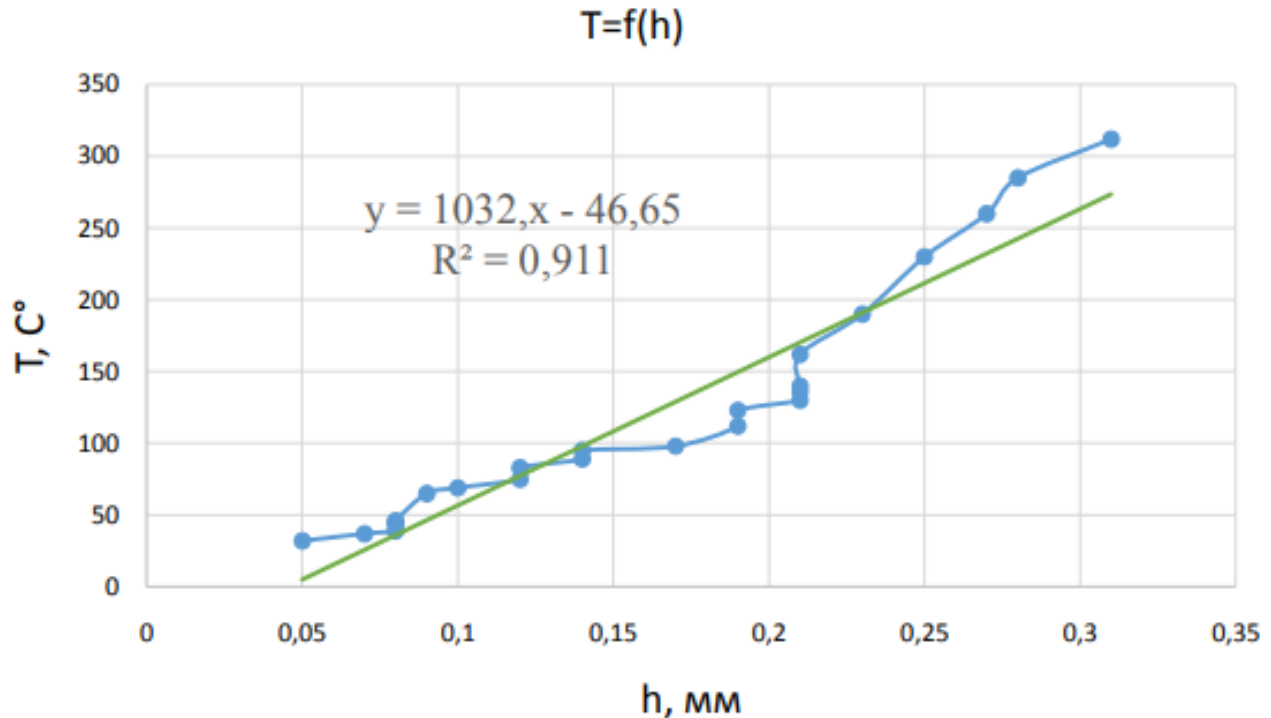


Рисунок 3.21 - Графік функції температури в зоні різання від параметру стійкості фрези при $V = 69\text{м/хв}$, $t = 10\text{мм}$, $F = 0,02\text{ мм/об}$

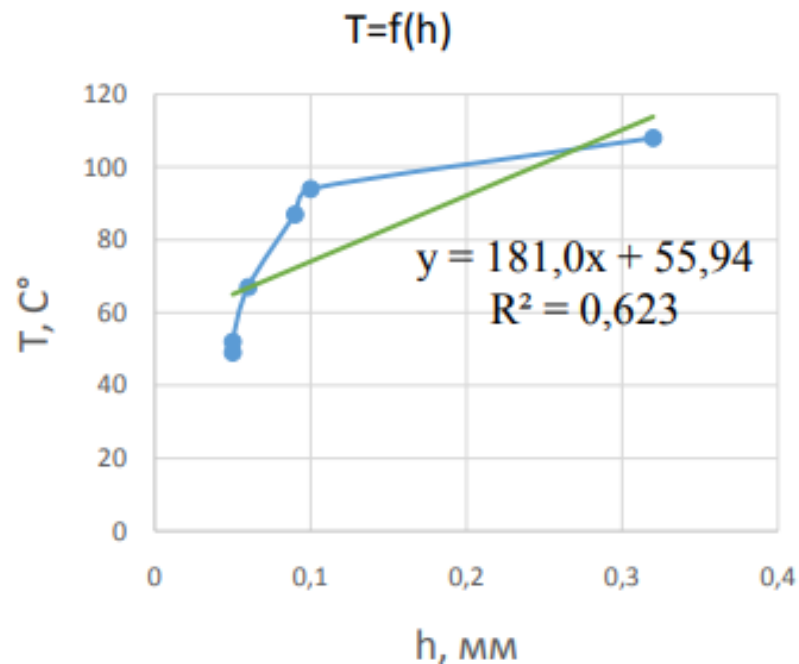


Рисунок 3.22 - Графік функції температури в зоні різання від параметру стійкості фрези при $V = 69\text{м/хв}$, $t = 1\text{мм}$, $F = 0,1\text{ мм/об}$

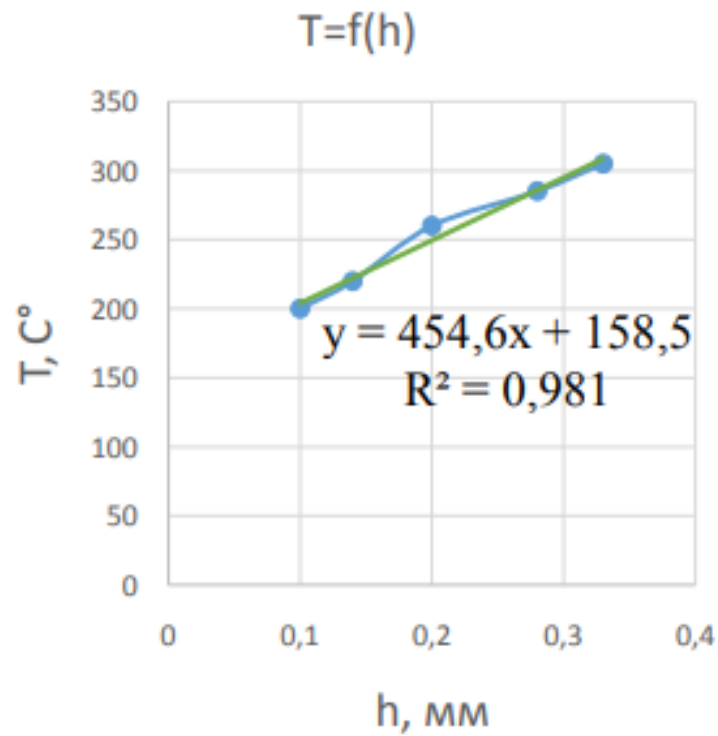


Рисунок 3.23 - Графік функції температури в зоні різання від параметру стійкості фрези при $V = 200\text{м/хв}$, $t = 10\text{мм}$, $F = 0,1\text{ мм/об}$

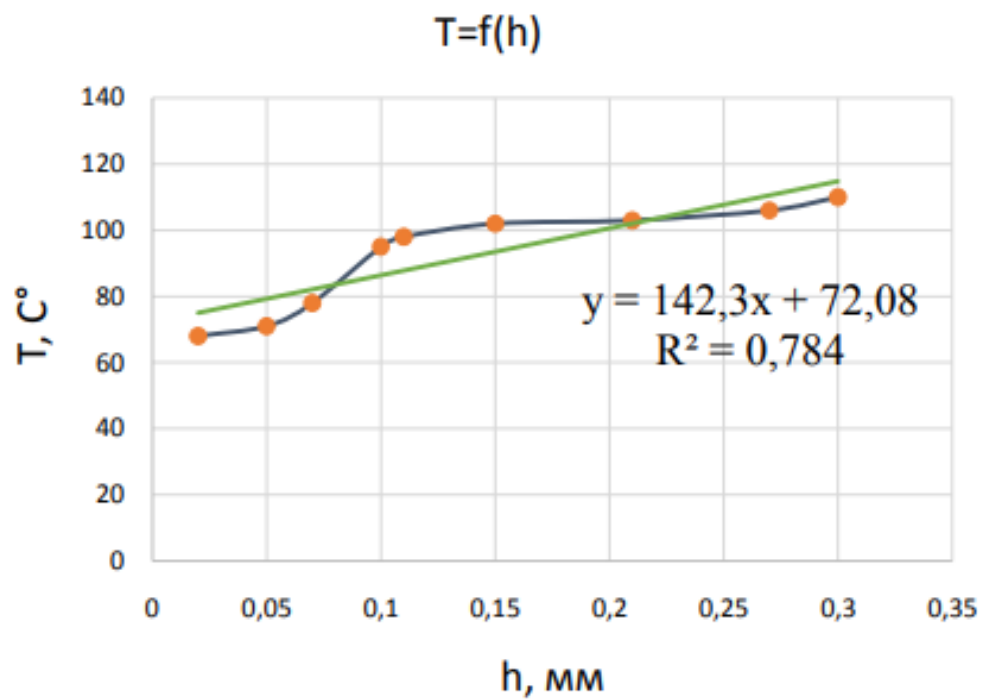


Рисунок 3.24 - Графік функції температури в зоні різання від параметру стійкості фрези при $V = 200\text{м/хв}$, $t = 1\text{мм}$, $F = 0,02\text{ мм/об}$

№ эксп.	V	S	t	A	B	A~	a
1	69	0,02	10	-46,65	1032,9	-46,65	-119,582
2	69	0,1	1	55,949	181,06	55,949	0,844679
3	200	0,1	10	158,52	454,67	158,52	1181,463
4	200	0,02	1	72,085	142,37	72,085	-0,898
							S= 1,21E-27
Определение k-ов a							
A=	1	69	0,02	10		-46,65	
	1	69	0,1	1	A~=	55,949	
	1	200	0,1	10		158,52	
	1	200	0,02	1		72,085	
A^(-1)=	0,832803	0,693914	-0,94391	0,417197	a=	-119,582	
	-0,00382	-0,00382	0,003817	0,003817		0,844679	
	-6,25	6,25	6,25	-6,25		1181,463	
	0,055556	-0,05556	0,055556	-0,05556		-0,898	
№ эксп.	V	S	t	A	B	B~	b
1	69	0,02	10	-46,65	1032,9	1032,9	616,0694
2	69	0,1	1	55,949	181,06	181,06	-2,35466
3	200	0,1	10	158,52	454,67	454,67	-3372,13
4	200	0,02	1	72,085	142,37	142,37	64,67444
							S= 1,37E-26
Определение k-ов b							
B=	1	69	0,02	10		1032,9	
	1	69	0,1	1	B~	181,06	
	1	200	0,1	10		454,67	
	1	200	0,02	1		142,37	
A^(-1)=	0,832803	0,693914	-0,94391	0,417197	b=	616,0694	
	-0,00382	-0,00382	0,003817	0,003817		-2,35466	
	-6,25	6,25	6,25	-6,25		-3372,13	
	0,055556	-0,05556	0,055556	-0,05556		64,67444	

Рисунок 3.25 - Розрахунок коефіцієнтів A_5^{\sim} і B_5^{\sim} рівняння $T = A_5^{\sim} + B_5^{\sim} \cdot h$

В підсумку було отримано функцію температури в зоні різання від параметру стійкості фрези, який було визначено як зношування фрези по задній поверхні h . Отримане лінійне емпіричне для функції $T=f(h)$ рівняння має наступний вигляд:

$$T = A_5^{\sim} + B_5^{\sim} \cdot h; \quad (3.5)$$

$$\text{де } A_5^{\sim} = -119.582 + 0.844679 \cdot v + 1181.463 \cdot S - 0.898 \cdot t$$

$$B_5^{\sim} = 616.0694 - 2.35466 \cdot v - 3372.13 \cdot S + 64.67444 \cdot t$$

Отримані в ході дослідження емпіричні рівняння були зібрані в Excel-таблиці, що дозволяють інженеру-технологу дуже зручно і в автоматичному режимі виконувати розрахунки з метою призначення режимів різання при фрезеруванні склопластиків. Приклад Excel-таблиць для виконання обчислень наведено на рисунку 3.26.

значення параметра		V (м/мин)	S (мм/об)	t (мм)	τ (мин)
h (мм) =	0,747	205	0,05	10	5
Ra (мкм) =	8,009	200	0,02	5	10
T (C) =	85,539	200	0,02	1	5
значення параметра		V (м/мин)	S (мм/об)	t (мм)	h (мм)
Ra (мкм) =	4,770	70	0,04	5	0,3
T (C) =	302,223	130	0,2	10	0,3

Рисунок 3.26 – Excel-таблиця для призначення режимів різання для процесу фрезерування склопластику

Отримані рівняння дають технологу можливість більш наочно уявляти собі що він має очікувати від прийнятих рішень. Наприклад користуючись цими рівняннями можливо будувати наочні графічні залежності одних параметрів від інших. Як приклад, на рисунку 3.27 наведено графік зміни температури в зоні різання як функція швидкості подачі S , при значенні зношування по задній поверхні фрези $h=0.3$ мм, глибині різання $t=1$ мм, і при значеннях швидкості різання $V_1=70$ м/хв і $V_2=200$ м/хв. На рисунку 3.28 представлена графічно функціональна залежність шорсткості обробленої поверхні Ra від швидкості подачі S при значенні параметру стійкості фрези $h=0.3$ мм, глибині різання $t=10$ мм і при значеннях швидкості різання $V_1=70$ м/хв і $V_2=200$ м/хв.

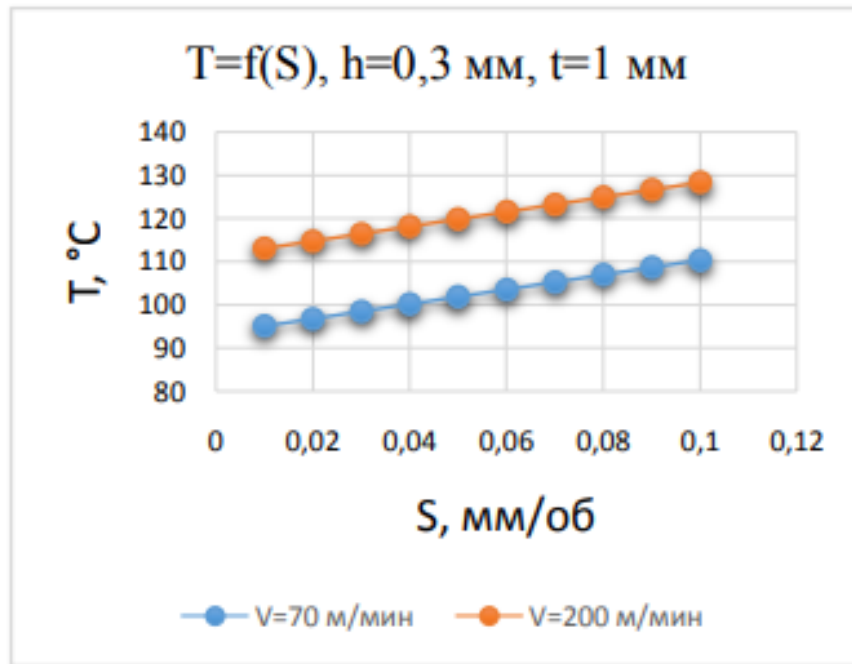


Рисунок 3.27 - Приклад побудови графіків температури в зоні різання за допомогою емпіричних формул

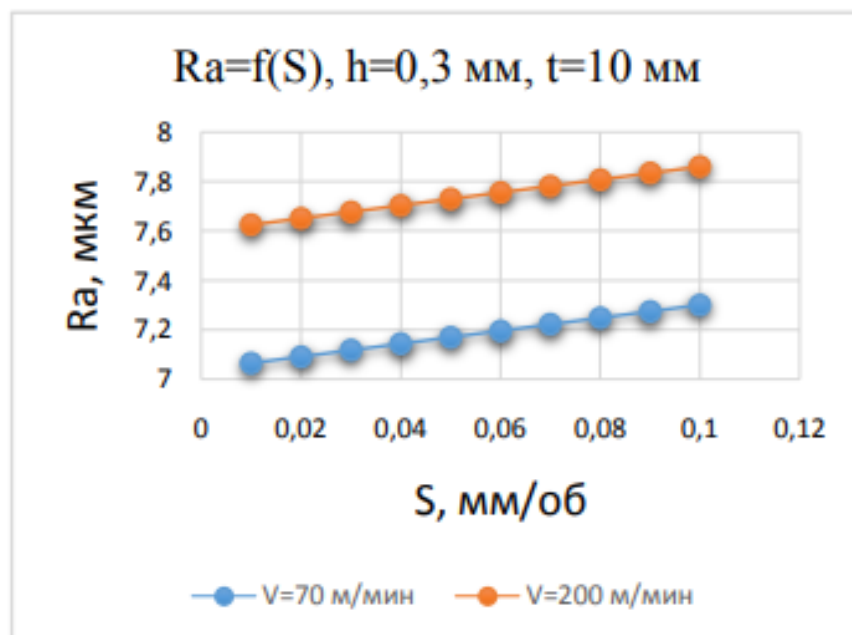


Рисунок 3.28 - Приклад побудови графіків шорсткості за допомогою емпіричних формул

3.4 Висновки до розділу

Під час проведення дослідження були виконані чотири серії експериментів. Проведені експерименти дозволили отримати необхідні для виконання дослідження експериментальні дані, які було зведено у таблиці 3.1-3.4. В підсумку були отримані математичні вирази 3.1-3.5 – емпіричні лінійні рівняння для розрахунку параметрів фрезерування склопластиків.

Вирази 3.1-3.5, що математично є лінійними функціями багатьох змінних, відображають як технологічні параметри процес фрезерування (швидкість різання та швидкість подачі, глибина різання) впливають на процес фрезерування склопластику, а саме на такі показники як: зношування фрези по задній поверхні, на температуру в зоні різання і на шорсткість обробленої поверхні.

В підсумку отримані емпіричні рівняння були зведені в Excel-таблиці, що є дуже зручним інструментом для роботи в руках інженера-технолога і дозволяють швидко проводити розрахунки і відображати інформацію у вигляді зручних графіків.

4 Математичне моделювання процесу фрезерування склопластику методом FEA

4.1 Побудова моделі

Із метою більш глибокого розуміння процесів, що відбуваються межах зони різання під час фрезерування композитних матеріалів і, зокрема, склопластиків, для визначення найбільш навантажених і схильних до зношування ділянок фрези, для визначення напружено-деформованого стану інструменту під час процесу фрезерування пропонується застосувати метод скінченних елементів. Для виконання дослідження використовувалось відповідно до проведеного в розділі **1.6** аналізу FEM-систем від різних виробників і відповідно до висновків цього розділу програмне забезпечення ANSYS від розробника ExplicitDynamics.

Задля того, щоб спростити роботу, а також із метою спрощення самої моделі що допоможе пришвидшити обчислення, модель буде побудована як клин, мета якого імітувати ріжучі кромки і поверхні зуба фрези. Під час роботи геометрія моделі змінювалась в наступних межах: задній кут γ варіювався в межах $= 0..15^\circ$, передній кут γ – в межах $5..20^\circ$. Значення радіусу при вершині – $r = 0.02$ мм. Глибина різання під час моделювання коливалась в межах $t = 1...5$ мм.

Алгоритм моделювання процесу фрезерування композитного матеріалу такий (рис. 4.1):

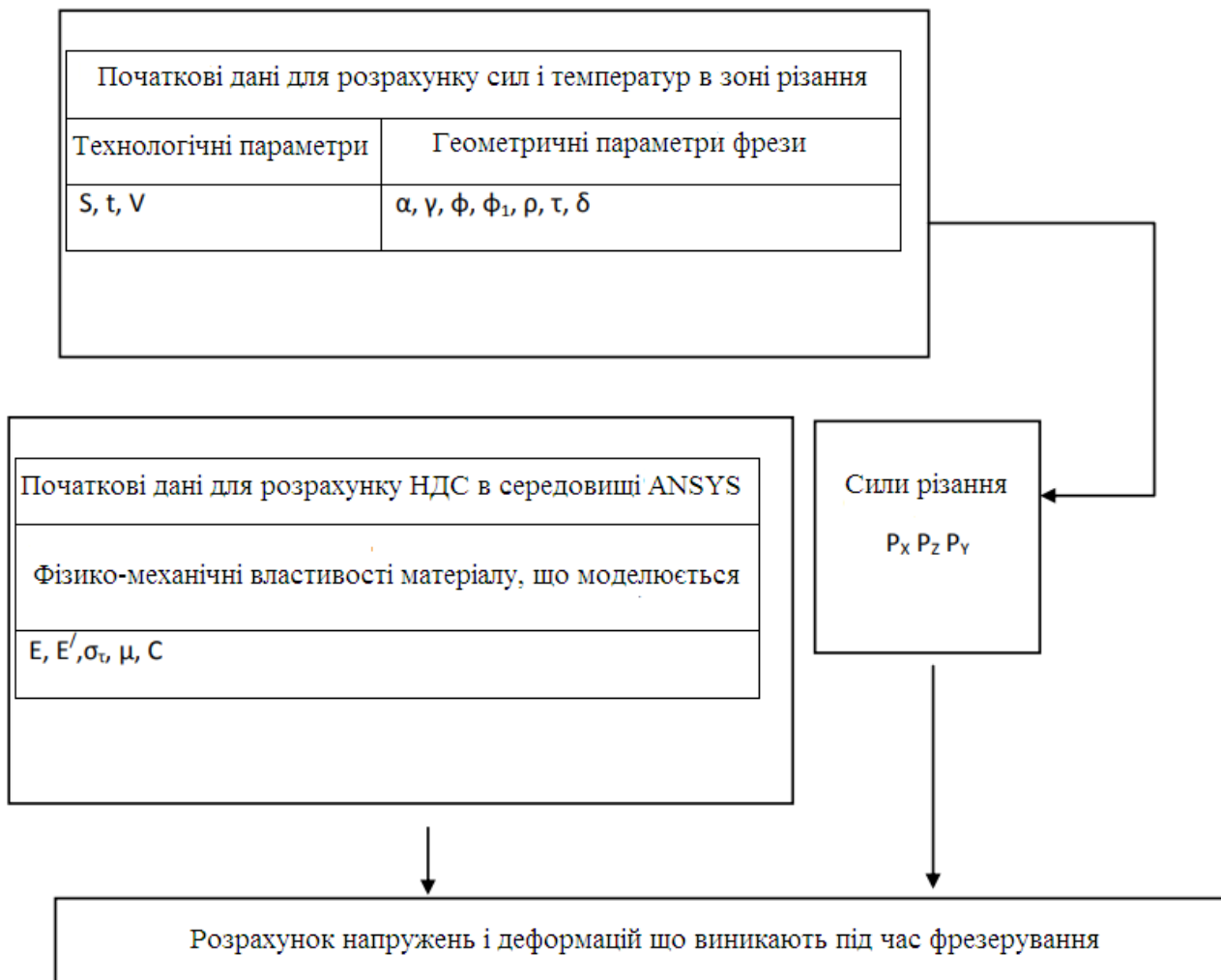


Рисунок 4.1 - Алгоритм моделювання процесу фрезерування композитного матеріалу

Properties of Outline Row 7: tools

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Density	15000	kg m ⁻³		
3	Isotropic Elasticity				
4	Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio			
5	Young's Modulus	8E+11	Pa		
6	Poisson's Ratio	0,2			
7	Bulk Modulus	4,444E+11	Pa		
8	Shear Modulus	3,333E+11	Pa		
9	Specific Heat	203	J kg ⁻¹ C ⁻¹		

Рисунок 4.2 – Характеристики фрези

Властивості композиційного матеріалу:

Orthotropic elasticity

-Young's Modulus X direction Pa = $1.2E + 11$

-Young's Modulus Y direction Pa = $7.5E + 09$

-Young's Modulus Z direction Pa = $7.5E + 09$

-Poisson's Ratio XY = 0.25

-Poisson's Ratio YZ = 0.4

-Poisson's Ratio XZ = 0.25

-Shear Modulus XY Pa = $4.5E + 09$

-Shear Modulus YZ Pa = $2.8E + 09$

-Shear Modulus XZ Pa = $4.5E + 09$

Orthotropic Stress Limits

-Tensile X direction Pa = $1.55E + 09$

-Tensile Y direction Pa = $1.4E + 07$

-Tensile Z direction Pa = $1.4E + 07$

-Compression X direction Pa = $-6.5E + 8$

-Compression Y direction Pa = $-5.5E + 7$

-Compression Z direction Pa = $-5.5E + 7$

-Shear XY Pa = $7E + 07$

-Shear YZ Pa = $3E + 07$

-Shear XZ Pa = $7E + 07$

Orthotropic Strain Limits

-Tensile X direction = 0.013

-Tensile Y direction = 0.002

-Tensile Z direction = 0

-Compression X direction = -0.005

-Compression Y direction = -0.013

-Compression Z direction = 0

-Shear XY = 0.012

-Shear YZ = 0

-Shear XZ = 0

Puck Constants

-Material classification - specific materials

-Compressive Indination XZ = 0

-Compressive Indination YZ = 0

-Tensle Indination XZ = 0

-Tensle Indination YZ = 0

-Degradatoin Parameter M = 0

-Degradatoin Parameter s = 0

-Interface Weakening Factor = 0

Ply Type

-Type - (Regular, Woven, Isotropic)

Additional Puck Constants

-Interfae Weakening Factor = 0.8

-Degradation Parameter s = 0.5

-Degradatoin Parameter M = 0.5

Результатом проведеної роботи є розроблена модель виконана методом скінченних елементів.

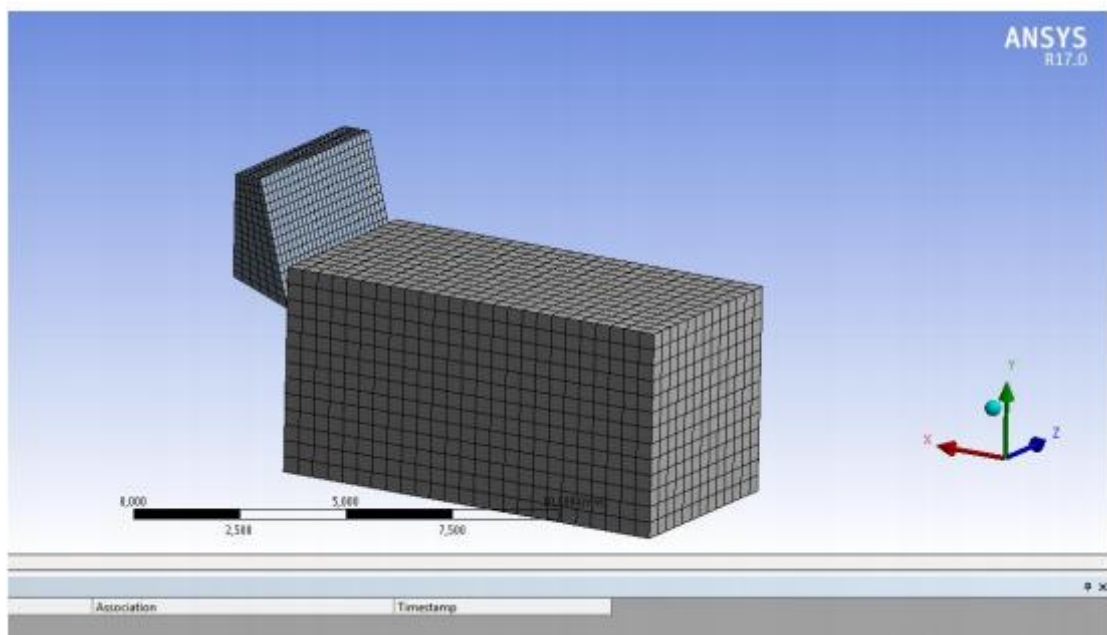


Рисунок 4.3 – Модель зуба фрези і заготовки виконана методом скінченних елементів

4.2 Аналіз результатів

На рисунках 4.4-4.6 представлені отримані результати роботи у вигляді графіків зміни в часі напружень, діючих в клині. Різні графіки відповідають за напруження, діючі уздовж різних осей: осей X, Y та Z.

Максимальні напруження, як можна зробити висновок за цими графіками, діють уздовж осі Z. Логічним кроком буде припустити, що це пов'язано саме із тим, що уздовж осі Z здійснювався процес різання.

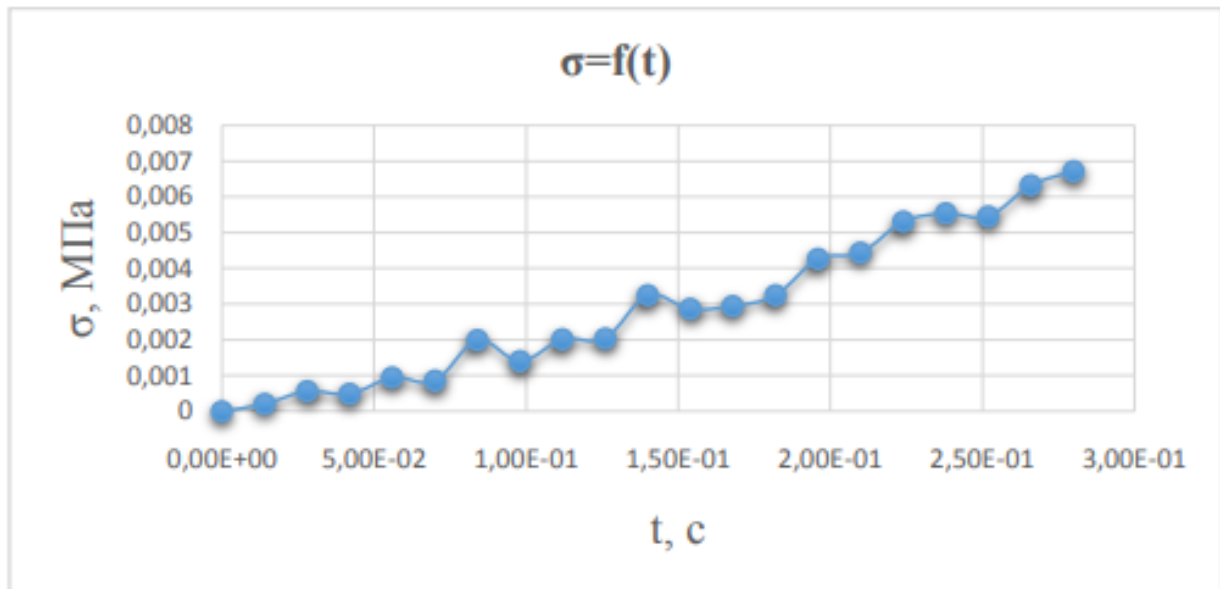


Рисунок 4.4 - Напруження в моделі зуба фрези в напрямку осі X

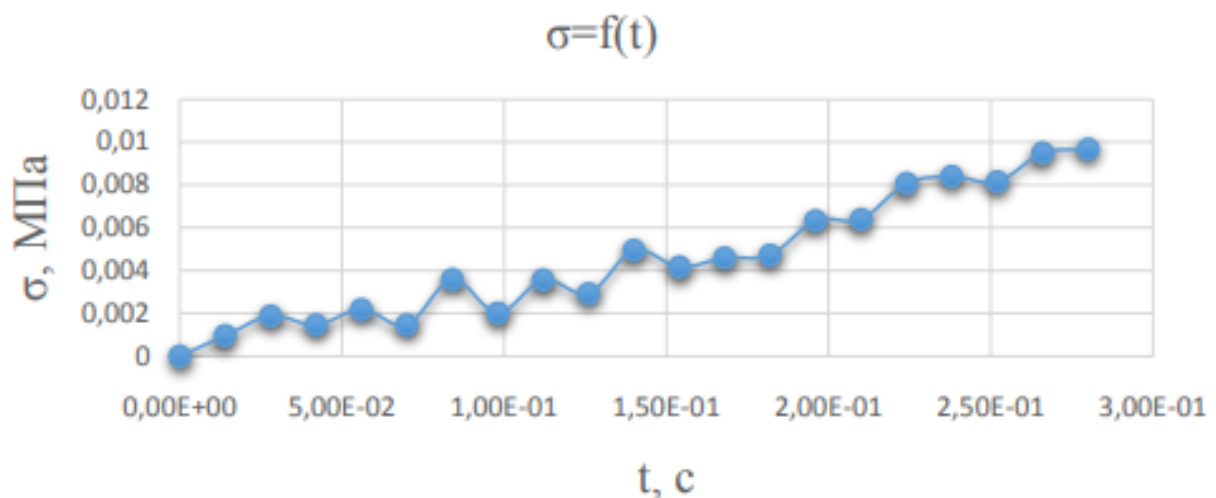


Рисунок 4.5 - Напруження в моделі зуба фрези в напрямку осі Y

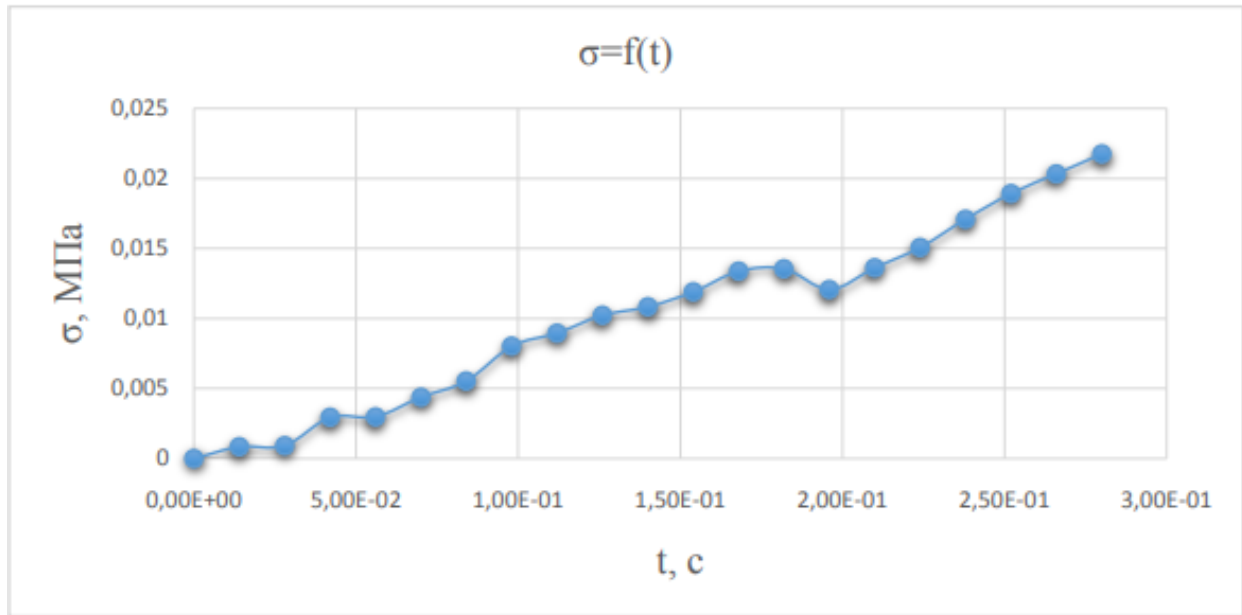


Рисунок 4.6 - Напруження в моделі зуба фрези в напрямку осі Z

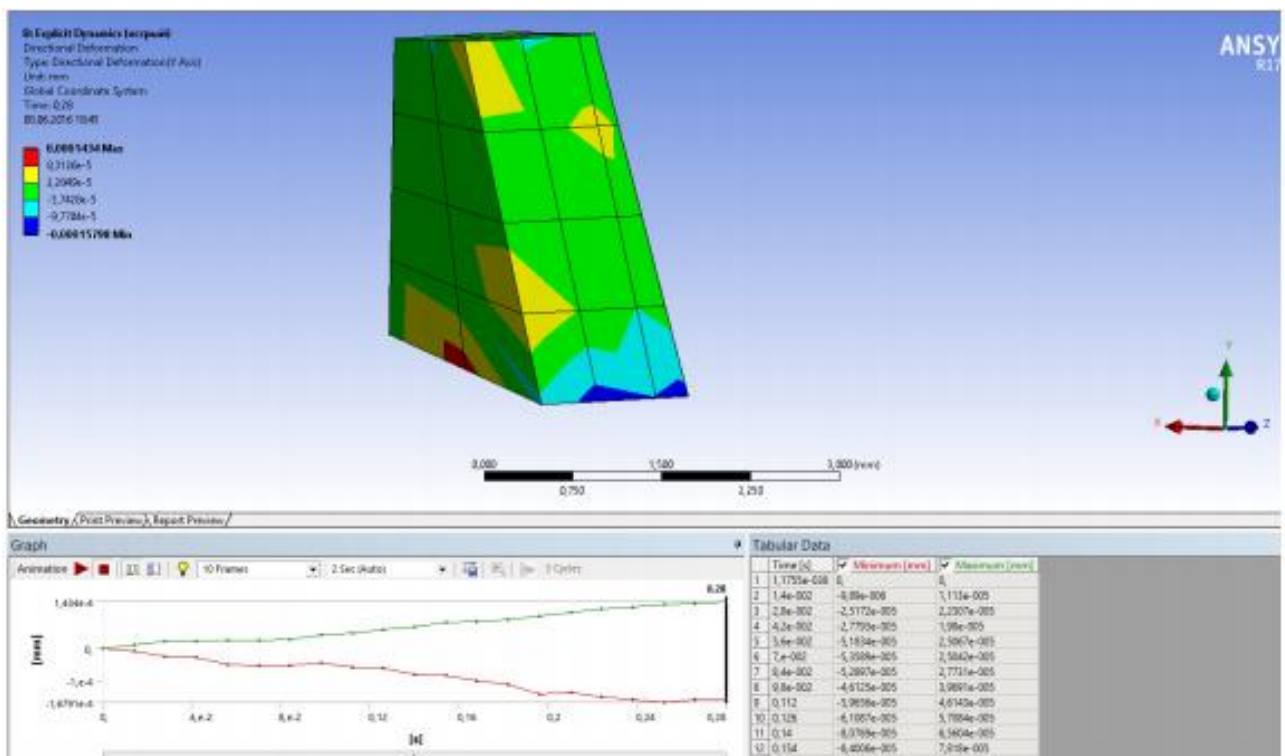


Рисунок 4.7 - Деформація в гострому зубі в напрямку осі Z

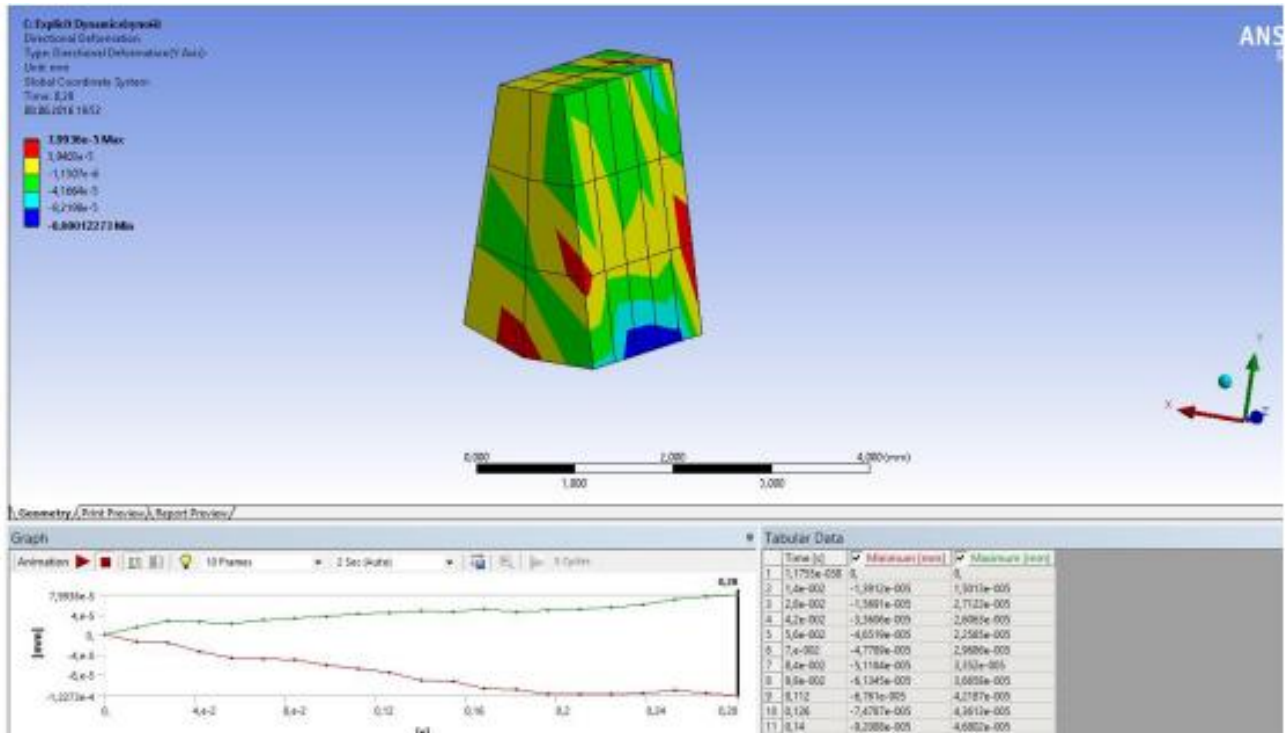


Рисунок 4.8 - Деформація в тупому зубі в напрямку осі Z

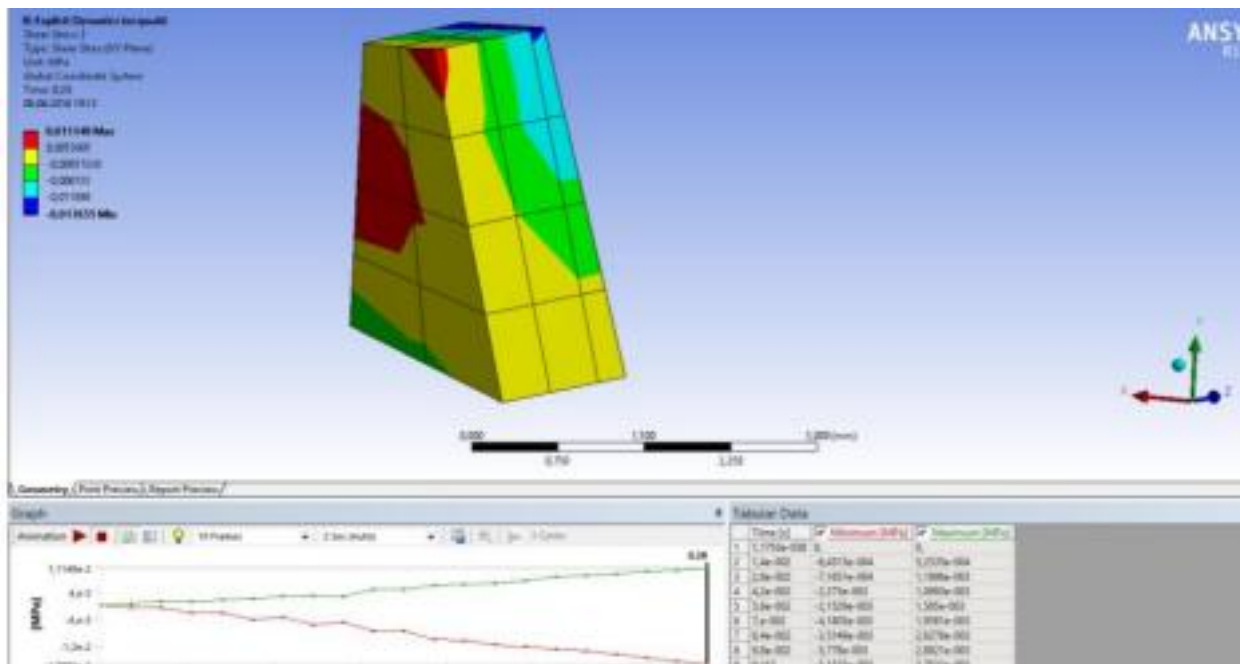


Рисунок 4.9 – Напруження зсуву в гострому зубі в напрямку осі Z

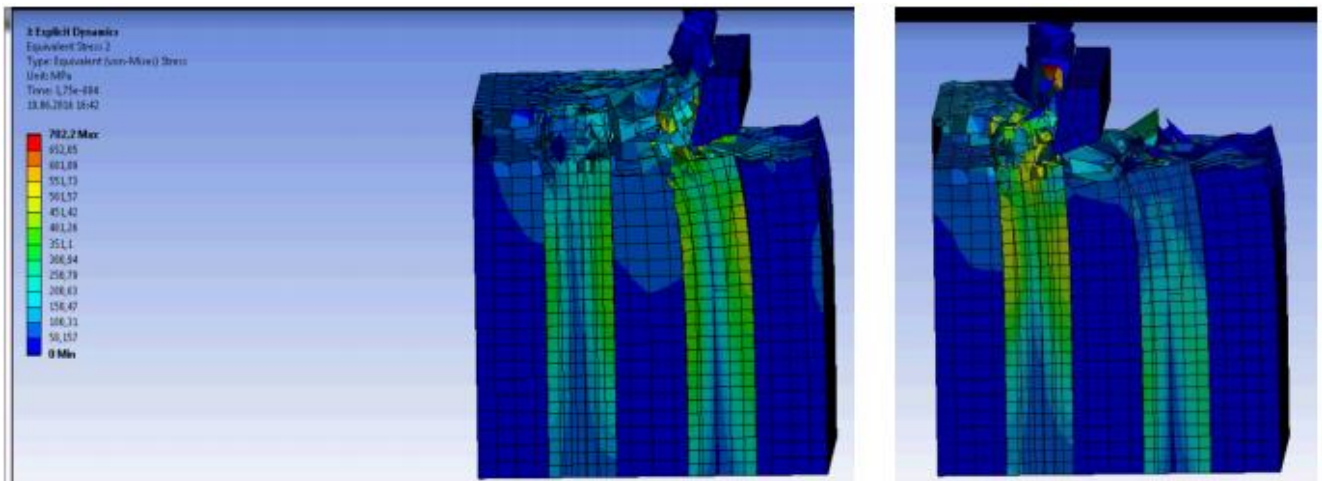


Рисунок 4.12 - Модель фрезерування склопластику із волокнами, розташованими перпендикулярно площині різання, вид збоку

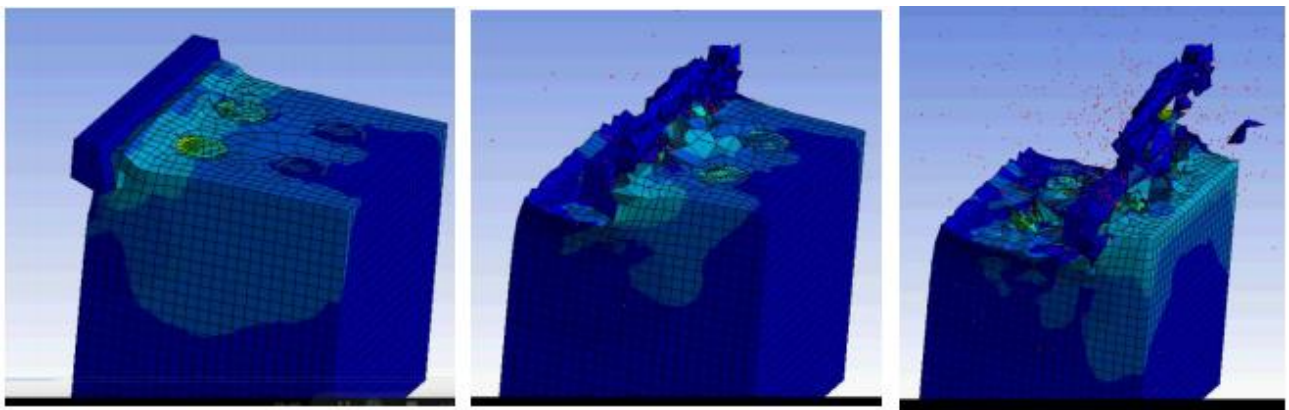


Рисунок 4.13 - Модель фрезерування склопластику із волокнами, розташованими перпендикулярно площині різання

4.3 Висновки до розділу

Під час виконання роботи в програмному середовищі кінцево-елементного аналізу ANSYS були виконані моделі зуба фрези і композитного матеріалу для обробки – склопластику КППН. Фізико-механічні характеристики типових склопластиків, епоксидної смоли і скловолокна для моделювання в ANSYS були приведені під час огляду літературних джерел (параграф 1.3) і під час стадії планування експерименту (параграф 2.2). Під час огляду літературних джерел було з'ясовано, що найбільші напруження у фрезі викликає перпендикулярне розташування волокон склопластику по відношенню до осі фрези. Тому для побудови моделі була обрана саме ця схема розташування волокон композитного матеріалу.

Спочатку математичне моделювання виконувалось прикладанням навантаження на модель зуба фрези. Цей метод дав незадовільний результат: замість того, щоб виникати в зоні різання, як це має бути, найбільші напруження виникали в точці прикладання навантаження до фрези (див. рис. 4.7-4.10).

Через це було вирішено виконати моделювання дещо по іншому, а саме надати динаміку фрезеруємії склопластиковій заготовці, закріпивши фрезу (див. рис. 4.11).

В підсумку найбільші напруження дійсно виникали по задній поверхні зуба фрези, як і передбачалось після проведеного огляду літературних джерел. Все це підтверджує адекватність розробленої засобами програмного забезпечення ANSYS обраної математичної моделі фрезерування склопластикового матеріалу. Розроблена модель не враховує і не може враховувати всіх факторів, наприклад ефекту налипання епоксидної смоли на ріжучий клин фрези і ефекти, що виникають внаслідок цього; не може враховувати також і абразивний вплив скловолокна на зношування фрези. Проте, своєю чергою, побудована модель дуже добре відображає багато інших чинників, наприклад вклад пружного впливу композитного матеріалу на зношування фрези по задній поверхні. Також, на наведених зображеннях можна розгледіти що в волокнах склопластику рід час їх потрапляння до зони різання виникають дуже значні напруження (рис. 4.12-4.13). Результатом цього процесу є виникнення механізму формування дефектного шару глибиною δ в обробленому матеріалі, що за своїми фізико-механічними характеристиками відрізняється від основної сукупності композиту. Механізм виникнення дефектного шару запускається внаслідок відшарування зміцнювальних волокон скла від епоксидної смоли внаслідок дії високих напружень.

5 Приклад використання результатів дослідження на практиці

5.1 Вихідні дані для вибору фрез і призначення режимів різання

Під час роботи над дослідженням було розроблено емпіричне рівняння 3.3, що визначає залежність шорсткості фрезерованої поверхні склопластику від критерію стійкості фрези h (параграф 3.2):

$$Ra = A_{\tilde{3}} + B_{\tilde{3}} \cdot h,$$

$$\text{де } A_{\tilde{3}} = 0.181646 + 0.009788 \cdot v + 12.501188 \cdot S + 0.123683 \cdot t$$

$$B_{\tilde{3}} = 6.46 - 0.01829 \cdot v - 50.3819 \cdot S + 1.223572 \cdot t$$

Перед початком роботи з проведення розрахунків режимів різання для фрезерування склопластику (композитного матеріалу) необхідно отримати такі дані:

1. Фізико-механічні властивості склопластику (або більш загально – композитного матеріалу) що буде фрезеруватися. Вибір матеріалу та його характеристик впливає на значення коефіцієнтів, що підставлятимуться в емпіричні рівняння.
2. Властивості ріжучого інструменту. Вибір фрези та її характеристики впливають на коефіцієнти емпіричних рівнянь.
3. Креслення деталі або інша документація, що визначить вимоги шорсткості до поверхні склопластику (композитного матеріалу) після обробки фрезеруванням.
4. Критерій стійкості фрези, що під час цієї роботи було прирівняний до параметру зношування фрези по задній поверхні h (див. параграф 1.7 для детального обґрунтування вибору критерію).

5.2 Алгоритм призначення режимів різання

Аналізуючи креслення деталі із конструкторськими вимогами інженер-технолог, використовуючи свій досвід та відповідні довідники, призначає припуск на обробку враховуючи якість поверхні, тип заготовки, обладнання для

обробки, шорсткість поверхні за кресленням тощо [23]. Задаючись значеннями шорсткості і стійкості інженер-технолог використовуватиме відповідні рівняння отримані в п. 3.2 із метою створення системи з двох рівнянь із двома невідомими:

$$\begin{cases} Ra = f_1(V, S, t) \\ T \sim h = f_2(V, S, t) \end{cases} \quad (5.1)$$

В наведеному прикладі інженер-технолог задав параметри шорсткості поверхні Ra , критерію зношування фрези по задній поверхні h , і глибини різання t . Складеної системи двох лінійних рівнянь із двома достатньо для розрахунку двох невідомих параметрів: значення швидкості різання v і швидкості подачі S .

Нарешті, виконується перевірка отриманих рішень пробною роботою верстата на обраних режимах різання. Виконується перевірка, чи забезпечується необхідна шорсткість.

5.3 Приклад реалізації алгоритму

1. Склопластикова труба КППН за ГОСТ Р 53201-2008
2. Креслення «Корпус» (рисунок 5.2)
3. Стійкість $h = 0,1$ мм

Рішення:

1. Вибір інструменту. Обираємо стандартну фрезу за ГОСТ 18372-73. Матеріал фрези ВК8. Наш вибір обґрунтовується тим, що наші коефіцієнти в емпіричній залежності розраховані під цю фрезу. Цією методикою пропонується, що для інших типів фрез із іншою геометрією результати розрахунків потрібно множити на коригуючий коефіцієнт, що враховуватиме відмінності.

За кресленням визначаємо, що ширина фрезерування становить $B = (140 - 110)/2 = 15$ мм, відповідно обираємо діаметр фрези $d = 16$ мм. Кількість зубів $z = 3$ (ГОСТ 18372-73). Геометрія обраної фрези відповідає геометричним характеристикам фрези, що використовувалася під час дослідження.

2. Глибина різання з технологічних довідників $t = 4$ мм.

3. Граничне значення параметру зношування фрези задаємо $h = 0,1$ мм.

4. Шорсткість $Ra = 3,2$ мкм (з креслення).

5. Вирішуємо систему рівнянь

$$\begin{cases} Ra = f_1(V, S, t) \\ T \sim h = f_2(V, S, t) \end{cases}$$

Отримуємо наступні рішення: $V = 170$ м/хв, $S = 0,01$ мм/об.

значение параметра		V (м/мин)	S (мм/об)	t (мм)	h (мм)
Ra (мкм)=	3,239	170	0,01	4	0,1

Рисунок 5.1 - Алгоритм призначення режимів різання

Під час пробного прогону необхідна шорсткість $Ra = 3,2$ мкм забезпечується, отже обрані режими різання є раціональними.

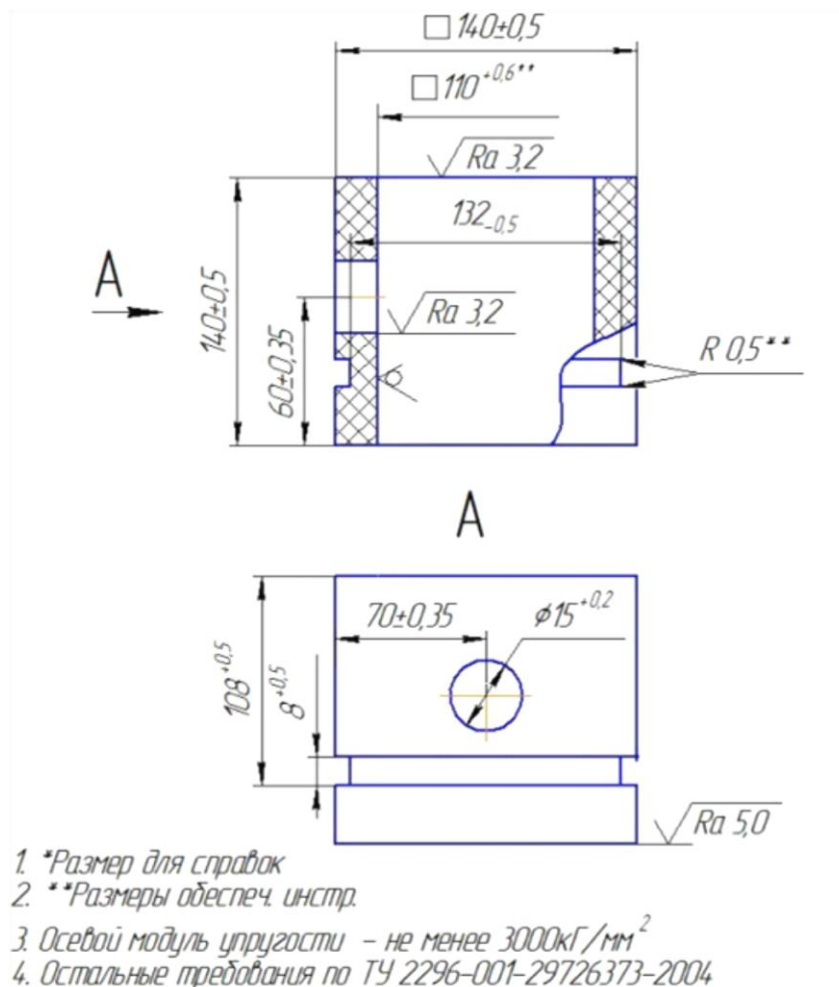


Рисунок 5.2 - Креслення корпусу

5.4 Висновки до розділу

Було наведено методику можливої практичної реалізації отриманих під час виконання дослідження результатів і емпіричних рівнянь із метою проведення розрахунків із призначення раціональних режимів різання для фрезерування склопластику.

Отримані рівняння наразі пристосовані для обробки склопластику фрезами, що виготовлені за ГОСТ 18372-73. Проте передбачається, що введенням коригуючих коефіцієнтів можливо призначати режими різання за даною методикою і для інших типів фрез.

Розроблену під час виконання дослідження методику із призначення режимів різання для обробки склопластиків впроваджено на підприємстві ТОВ «Діатек Сервіс».

6. Розробка стартап-проекту

Розділ має на меті проведення маркетингового аналізу стартап проекту задля визначення принципової можливості його ринкового впровадження та можливих напрямів реалізації цього впровадження. Проведення маркетингового аналізу передбачає виконання нижченаведених кроків.

6.1 Опис ідеї проекту

Розробка та продаж програмного забезпечення, що міститиме бази даних типових композитних матеріалів і кінцевих фрез, яке призначена для виконання розрахунків із призначення раціональних режимів різання під час фрезерування композитних матеріалів, і яке використовуватиме розроблені під час виконання дослідження емпіричні рівняння і методику розрахунків.

Програмне забезпечення вмітиме розраховувати коригуючі коефіцієнти для врахування відмінностей геометрії фрез, або відмінності, наприклад, кута нахилу армувальних волокон в аналогічних за рештою показників композитних матеріалах. Для цього програмне забезпечення міститиме обширні бази даних коефіцієнтів, розрахованих під час типових опитів із застосуванням типових матеріалів і фрез і бази даних табличних значень коефіцієнтів та/або рівнянь для їх розрахунків (потрібні додаткові дослідження).

Завдання цього програмного забезпечення – бути помічником для інженерів-технологів та програмістів/налагоджувальників/операторів верстатів із числовим програмним керуванням в призначенні раціональних режимів різання для обробки композитів.

Мета цього проекту – заповнити існуючий пробіл в довідниковій літературі для інженерів-технологів і підвищити економічну ефективність виробничих підприємств.

Таблиця 6.1 – Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Розробка та продаж програмного забезпечення для призначення режимів різання під час фрезерування композитів	Промисловість	Підвищення економічної ефективності виробництва шляхом підвищення продуктивності обробки, стійкості інструмента і якості обробленої поверхні готових виробів

Аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї (чим відрізняється від існуючих аналогів та замінників) порівняно із пропозиціями конкурентів передбачає:

Таблиця 6.2 - Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№	Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів				W	Z	S
		Проект	Coroguide (Sandvik Coromant)	Walter Machining Calculator	AdvantEdge			
1	Можливість роботи з композитними матеріалами	+	—	+	-	—	—	+
2	Можливість роботи із різними типами фрез	+	+	+	+	—	+	—
3	Високі вимоги до кваліфікації інженера	—	—	—	+	—	+	—
4	Можливість розраховувати напруження	—	—	—	+	—	+	—
5	Високі вимоги до розрахункової потужності комп'ютера	—	—	—	+	—	+	—
6	Можливість виводу інформації у вигляді зручних графіків	+	—	—	+/-	—	—	+

7	Можливість проводити розрахунок стійкості інструменту	+	—	—	—	—	—	+
8	Можливість розрахувати бажаний результат без ітерацій	+	—	—	—	—	—	+

6.2 Технологічний аудит ідеї проекту

В межах даного підрозділу необхідно провести аудит технології, за допомогою якої можна реалізувати ідею проекту (технології створення товару).

Визначення технологічної здійсненності ідеї проекту передбачає аналіз таких складових (табл. 6.3):

- За якою технологією буде виготовлено товар згідно ідеї проекту?
- Чи існують такі технології, чи їх потрібно розробити/доробити?
- Чи доступні такі технології авторам проекту?

Таблиця 6.3 - Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Розробка та продаж програмного забезпечення	Програмна реалізація аналітичних виразів	Наявні	Доступні
2	для призначення режимів різання під час фрезерування композитів	Програмна реалізація побудови графіків	Наявні	Доступні
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: Програмне забезпечення для призначення режимів різання під час фрезерування композитів				

За всіма показниками проект можливо запустити.

6.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Визначення ринкових можливостей, які можна використати під час ринкового впровадження проекту, та ринкових загроз, які можуть перешкодити реалізації проекту, дозволяє спланувати напрями розвитку проекту із урахуванням стану ринкового середовища, потреб потенційних клієнтів та пропозицій проектів-конкурентів.

Спочатку проводиться аналіз попиту: наявність попиту, обсяг, динаміка розвитку ринку (Таблиця 6.4)

Таблиця 6.4 - Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ п/п	Показники стану ринку	Характеристика
1	Кількість головних гравців	Відносно невелика кількість виробників котрі займаються виробництвом аналогічної продукції
2	Загальний обсяг продаж	не менше як 1000 од. на рік
3	Динаміка ринку	Зростає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Недовіра до продукції країн-виходців з СРСР
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Немає
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	85%

Надалі визначаються потенційні групи клієнтів, їх характеристики, формується орієнтовний перелік вимог до товару для кожної групи.

Таблиця 6.5 - Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

<i>№ n/n</i>	<i>Потреба, що формує ринок</i>	<i>Цільова аудиторія</i>	<i>Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів</i>	<i>Вимоги споживачів до товару</i>
1	Простота експлуатації	Приватні особи	Можливість швидко призначити обґрунтовані режими	<ul style="list-style-type: none"> - Зручний інтерфейс - Невелика ціна
2	Зниження вимог до кваліфікації персоналу	Малі виробництва	Можливість роботи із дуже широким спектром матеріалів	<ul style="list-style-type: none"> - Зручний інтерфейс - Невелика ціна - Велика база даних матеріалів
3	Зниження вимог до кваліфікації персоналу	Середні виробництва	Можливість роботи із дуже широким спектром фрез	<ul style="list-style-type: none"> - Зручний інтерфейс - Підвищена точність розрахунків - Великі бази даних матеріалів і фрез
4	Зниження вимог до кваліфікації персоналу	Великі виробничі підприємства	Максимальна продуктивність виробництва	<ul style="list-style-type: none"> - Максимально висока точність розрахунків

Після визначення потенційних груп клієнтів проводиться аналіз ринкового середовища: складаються таблиці факторів, що сприяють ринковому впровадженню проекту, та факторів, що йому перешкоджають (табл. № 6.6-6.7). Фактори в таблиці подані в порядку зменшення значущості.

Таблиця 6.6 - Фактори загроз

<i>№ n/n</i>	<i>Фактор</i>	<i>Зміст загрози</i>	<i>Можлива реакція</i>
1	Недовіра новому	Недовіра до нового продукту на ринку	Вибір перевіреного товару конкурента в якості прототипу. Лабораторні тестування з відкритими результатами. Надання тимчасової безкоштовної пробної ліцензії
2	Недосконалість	Виявлення недосконалості в продукті порівняно з продуктом конкурента	Перерахунок коефіцієнтів і рівнянь в цілому, перевірка програмного коду продукту, зворотній зв'язок із клієнтом
3	Підвищення конкуренції	Поява в асортименті конкурентів аналогічної продукції	Патентування методики

Таблиця 6.7 - Фактори можливостей

<i>№ n/n</i>	<i>Фактор</i>	<i>Зміст можливості</i>	<i>Можлива реакція</i>
1	Розширення баз даних	Оновлення продукту із метою розширення баз даних	Додання нових типів фрез і матеріалів, уточнення таблиць коефіцієнтів і т. ін.
2	Розширення засобів обробки для розрахунків	Випуск у самостійному вигляді, або у вигляді оновлення до існуючої програми	Доповнення продукту можливістю розрахунків режимів різання під час точіння, свердління і т. ін.
3	Розрахунки із обробки некомпозитних матеріалів	Оновлення програмного продукту і баз даних	Розширення можливостей програми і залучення нових користувачів за рахунок додання можливості працювати із некомпозитними матеріалами

Аналіз пропозиції: визначаються загальні риси конкуренції на ринку

Таблиця 6.8 - Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

<i>Особливості конкурентного середовища</i>	<i>В чому проявляється дана характеристика</i>	<i>Вплив на діяльність підприємства</i>
1. Тип конкуренції	Олігополістична	Зацікавити новітнім оригінальним та якісним продуктом
2. Рівень конкурентної боротьби	Локальна	Вихід на міжнародний ринок
3. За галузевою ознакою	Внутрішньогалузева	Підтверджувати якість продукту
4. Конкуренція за видами продуктів:	Програмно-видова	Підтверджувати якість продукту та оригінальність
5. За характером конкурентних переваг	Цінова	Доступність продукту
6. За інтенсивністю	Марочна	Розвиток марки/бренда

Після аналізу конкуренції проводиться більш детальний аналіз умов конкуренції в галузі

Таблиця 6.9 - Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

	<i>Прямі конкуренти в галузі</i>	<i>Потенційні конкуренти</i>	<i>Постачальники</i>	<i>Клієнти</i>	<i>Товари-замінники</i>
<i>Складові аналізу</i>	Walter machining, DEFORM	Бар'єри входу на ринок є порівняно незначними	Продукт є незалежним від постачальників	Споживачі мають широку географію	Відсутні
Висновки:	Інтенсивність конкурентної на міжнародному рівні боротьби підвищена	Даний продукт є перспективним, має можливість виходу на ринок, потенційних конкурентів мало	Незалежність від постачальників є сильною стороною продукту	Клієнти обирають з того що мають та не диктують умов	Обмеження через товари-замінники відсутні

Отже, товари-замінники відсутні, конкуренція на міжнародному рівні наявна, але продукт перспективний, конкурентоспроможний і має можливість виходу на ринок.

Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

Таблиця 6.10 - Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ n/n	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування
1	Недовіра новому	Недовіра до нового продукту на ринку
2	Недосконалість	Виявлення недосконалості в продукті порівняно з продуктом конкурента
3	Підвищення конкуренції	Поява в асортименті конкурентів аналогічної продукції
4	Розширення асортименту	Виготовлення інших типів велосипедних компонентів
5	Стандартизація	Впровадження нових стандартів компонентів
6	Виконання підрядних робіт	Постачання програмного забезпечення компаніям виробникам

За визначеними факторами конкурентоспроможності проводиться аналіз сильних та слабких сторін стартап-проекту (табл. 6.11).

Таблиця 6.11 - Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін

№ n/n	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Недовіра новому	15							+
2	Не досконалість	14	+						
3	Підвищення конкуренції	16		+					
4	Розширення асортименту	19							+
5	Стандартизація	17				+			
6	Виконання підрядних робіт	18							+

Фінальним етапом ринкового аналізу можливостей впровадження проекту є складання SWOT-аналізу (матриці аналізу сильних (Strength) та слабких (Weak) сторін, загроз (Troubles) та можливостей (Opportunities) на основі виділених ринкових загроз та можливостей, та сильних і слабких сторін.

Перелік ринкових загроз та ринкових можливостей складається на основі аналізу факторів загроз та факторів можливостей маркетингового середовища.

Ринкові загрози та ринкові можливості є наслідками (прогнозованими результатами) впливу факторів, і, на відміну від них, ще не є реалізованими на ринку та мають певну ймовірність здійснення. Наприклад: зниження доходів потенційних споживачів – фактор загрози, на основі якого можна зробити

прогноз щодо посилення значущості цінового фактору при виборі товару та відповідно, – цінової конкуренції (а це вже – ринкова загроза).

Таблиця 6.12 - SWOT- аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: Підвищена точність розрахунків режимів різання при обробці композитів, можливість швидкого пошуку оптимального рішення за обраними критеріями	Слабкі сторони: Конкуренція на міжнародному рівні , малий обсяг напрацювань та досвіду у порівнянні з конкурентами
Можливості: Зменшення ціни, розширення асортименту	Загрози: недовіра до бренду

На основі SWOT-аналізу розробляються альтернативи ринкової поведінки (перелік заходів) для виведення стартап-проекту на ринок та орієнтовний оптимальний час їх ринкової реалізації з огляду на потенційні проекти конкурентів, що можуть бути виведені на ринок

Визначені альтернативи аналізуються з точки зору строків та ймовірності отримання ресурсів (табл. 6.13).

Таблиця 6.13 - Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

<i>№ п/п</i>	<i>Альтернатива ринкової поведінки</i>	<i>Ймовірність отримання ресурсів</i>	<i>Строки реалізації</i>
1.	Доробка, усунення Недоліків	+	Від 3х до 6ти місяців
2.	Публікація результатів лабораторних досліджень та тестів	+	Від 1го до 3х місяців
3.	Надання пробних версій програми	+	Від 3х до 12ти місяців
4.	Участь у міжнародних промислових виставках	+	Від 1го до 3х місяців

6.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів.

Таблиця 6.14 - Вибір цільових груп потенційних споживачів

<i>№ n/n</i>	<i>Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів</i>	<i>Готовність споживачів сприйняти продукт</i>	<i>Орієнтовний попит в межах цільової групи</i>	<i>Інтенсивність конкуренції в сегменті</i>	<i>Простота входу у сегмент</i>
1	Група великих підприємств	±	+	+	±
2	Група середніх підприємств	+	+	+	+
3	Малі підприємства і приватні особи	+	±	-	+
Які цільові групи обрано: стратегія диференційованого маркетингу					

Для роботи в обраних сегментах ринку необхідно сформулювати базову стратегію розвитку.

Таблиця 6.15 - Визначення базової стратегії розвитку

<i>№ n/n</i>	<i>Обрана альтернатива розвитку проекту</i>	<i>Стратегія охоплення ринку</i>	<i>Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи</i>	<i>Базова стратегія розвитку</i>
		Стратегія диференційованого маркетингу	Розширення лінійки виробів	Стратегія диференціації

Наступним кроком є вибір стратегії конкурентної поведінки

Таблиця 6.16 - Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

<i>Чи є проект «періопроходьцем» на ринку?</i>	<i>Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?</i>	<i>Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?</i>	<i>Стратегія конкурентної поведінки</i>
Ні	Частково залучення нових, частково існуючих	Не буде	Наслідкування лідера

На основі вимог споживачів з обраних сегментів до постачальника (стартап-компанії) та до продукту а також в залежності від обраної базової стратегії розвитку та стратегії конкурентної поведінки розробляється стратегія позиціонування що полягає у формуванні ринкової позиції (комплексу асоціацій), за яким споживачі мають ідентифікувати торгівельну марку/проект.

Таблиця 6.17 - Визначення стратегії позиціонування

<i>№ n/n</i>	<i>Вимоги до товару цільової аудиторії</i>	<i>Базова стратегія розвитку</i>	<i>Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту</i>	<i>Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)</i>
1	Якість розрахунків, зручний інтерфейс	Стратегія диференціації	Масові характеристики	Новизна виробу, цінова політика, якість роботи продукту, виключні характеристики

6.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Першим кроком є формування маркетингової концепції товару, який отримає споживач. Для цього у потрібно підсумувати результати попереднього аналізу конкурентоспроможності товару.

Таблиця 6.18 - Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами
1	Покращені характеристики	Виконання розрахунків оптимальних режимів роботи	Використання нової методики для виконання розрахунків
2	Низька вартість	Знижена собівартість виробу	Нижча ціна
3	Можливість вибору	Розширення лінійки програм	Ширший асортимент товару для всіх груп потенційних покупців

Надалі розробляється трирівнева маркетингова модель товару: уточняється ідея продукту та/або послуги, його фізичні складові, особливості процесу його надання.

Таблиця 6.19 - Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові
I. Товар за задумом	Продукт являє собою програмне забезпечення для розрахунків оптимальних режимів обробки композитів фрезеруванням
II. Товар у реальному виконанні	Якість: пробний період безкоштовного користування
	Придбання: через мережу інтернет на сайті компанії виробника
	Реалізація: програмний продукт зі зручним інтерфейсом
	Марка: назва організації-розробника «Machining Technologies» + назва товару «PerfectMill»
III. Товар із підкріпленням	До продажу: тестування програмного коду продукту
	Після продажу: оновлення через інтернет в разі виявлення недоліків програми
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: реєстрація торгової марки, промислового зразка, корисної моделі, винаходу, методика розрахунків.	

Після формування маркетингової моделі товару слід особливо відмітити – чим саме проект буде захищено від копіювання. Захист може бути організовано за рахунок захисту ідеї товару (захист інтелектуальної власності), або ноу-хау, чи комплексне поєднання властивостей і характеристик, закладене на другому та третьому рівнях товару.

Наступним кроком є визначення цінових меж, якими необхідно керуватись при встановленні ціни на потенційний товар (остаточне визначення ціни відбувається під час фінансово-економічного аналізу проекту), яке передбачає аналіз ціни на товари-аналоги або товари субституту, а також аналіз рівня доходів цільової групи споживачів (табл. 6.20). Аналіз проводиться експертним методом.

Таблиця 6.20 - Визначення меж встановлення ціни

<i>№ п/п</i>	<i>Рівень цін на товари-аналоги</i>	<i>Рівень доходів цільової групи споживачів</i>	<i>Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу</i>
1	Від 100\$	Від 1000\$	80-130\$

Наступним кроком є визначення оптимальної системи збуту, в межах якого приймається рішення (табл. 6.21):

- Проводити збут власними силами або залучати сторонніх посередників (власна або залучена система збуту);
- Вибір та обґрунтування оптимальної глибини каналу збуту;
- Вибір та обґрунтування виду посередників.

Таблиця 6.21 - Формування системи збуту

<i>№ п/п</i>	<i>Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів</i>	<i>Функції збуту, які має виконувати постачальник товару</i>	<i>Глибина каналу збуту</i>	<i>Оптимальна система збуту</i>
1	Збут через інтернет	Збут власними силами	міжнародний	структурована

Останньою складовою маркетингової програми є розроблення концепції маркетингових комунікацій, що спирається на попередньо обрану основу для позиціонування, визначену специфіку поведінки клієнтів (табл. 6.22).

Таблиця 6.22 - Концепція маркетингових комунікацій

<i>№ п/п</i>	<i>Специфіка поведінки цільових клієнтів</i>	<i>Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти</i>	<i>Ключові позиції, обрані для позиціонування</i>	<i>Завдання рекламного повідомлення</i>	<i>Концепція рекламного звернення</i>
1	Пошук аналогів	Форуми, експертні консультації тощо	Програмне забезпечення	Новизна	Якісний результат роботи, простота користування та ціна

6.6 Висновки до розділу

З аналізу даного стартапу видно, що він має усі перспективи стати успішним проектом. Значну роль в даному стартапі відіграє фактор новизни на ринку, що одразу приверне увагу потенційних покупців, і знизить конкуренцію на початкових етапах. Головною небезпекою є не виправдання очікувань споживачів яку наважаться придбати новий продукт, це може звести нанівець усі зусилля прикладені до створення продукту. Тому проект потребує ретельної підготовки, тестувань. У випадку вдалого виходу на ринок відкриються великі перспективи для розвитку проекту, такі як співпраця з відомими виробничими підприємствами.

Висновки

Головна мета цієї магістерської дисертації полягає у пошуку алгоритму із призначення раціональних режимів різання під час фрезерування склопластиків, що в підсумку має забезпечити досягнення бажаної якості обробки поверхні виробу, що обробляється і підвищити стійкість інструменту. Під час послідовного виконання цього дослідження були отримані такі результати:

1. Була розроблена спеціальна методика виконання дослідження, що має на меті встановлення зв'язку між технологічними параметрами фрезерування склопластику і підсумковими характеристиками якості обробленої поверхні і зношування фрези.

2. Була розроблена математична модель самого процесу фрезерування композитного матеріалу, побудована методом скінченних елементів із використанням програмного середовища ANSYS. Вона дозволяє краще зрозуміти процеси, що відбуваються в зоні різання під час фрезерування композитного матеріалу. Також перспективним є вивчення можливості використання такої моделі із метою розрахунку впровадження коригуючих коефіцієнтів, при використанні фрез або композитних матеріалів, що відрізняються від тих, які були використані для виконання цієї роботи.

3. Під час виконання дослідження були отримані емпіричні лінійні рівняння, що дозволяють виконувати розрахунки із призначення раціональних режимів різання із метою отримання бажаної стійкості інструмента і якості обробленої поверхні під час фрезерування склопластику. Отримані рівняння дають можливість створювати в таких програмних засобах, як Excel, зручні таблиці і наочні графіки залежності одних параметрів процесу фрезерування склопластику від інших, що має бути зручним інструментом в руках інженера-технолога.

4. Результати виконаного дослідження враховані при розробленні технологічних процесів обробки і монтажу систем вентиляції, опалення і водопостачання на підприємстві ТОВ «Діатек Сервіс» (див. додаток).

Таким чином всі цілі цієї магістерської дисертації, включно з головною метою цього дослідження – підвищенням стійкості кінцевих фрез під час обробки композиційних матеріалів, були досягнуті в ході виконання роботи.

Перелік посилань

1. ДСТУ 2241-93 Матеріали композитні. Склопластики. Терміни та визначення.
2. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов: Учеб. для вузов. – 10-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. – 592 с. (Сер. Механика в техническом университете; Т.2).
3. Лебедев П.В. Технологическое обеспечение качества резьбовых соединений в деталях из высокопрочных композиционных полимерных материалов [Текст]: дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук (05.02.08)/ Лебедев Павел Владимирович; АлтГТУ. – Барнаул, 2011. – 212 с.
4. Единая коллекция цифровых образовательных ресурсов [Электронный ресурс]. URL: <http://files.school-collection.edu.ru/dlrstore/4ee22d2b-8dcc-9308-877a53118dc6979e/1012459A.htm>
5. Пуск!Бу. Журнал [Электронный ресурс]. URL: <http://www.refu.ru/refs/93/21921/1.html>
6. Свойства и особенности труб из стеклопластика [Электронный ресурс]. URL: <http://buildingsar.ru/свойства-и-особенности-труб>
7. Zhelezyaka [Электронный ресурс]. URL: <http://zele.ru/novosti/raznoe/samayabolshaya-lopast-vetrogeneratora-7035/>
8. Композит. Оборудование для напыления стеклопластика [Электронный ресурс]. URL: http://www.composite.ru/equipment/grp_prod/
9. ForComposite. Статьи. Пултрузия [Электронный ресурс]. URL: <http://www.forcomposite.ru/article/technology/pultrusion/>
10. Стеклотехнология. Свойства стеклопластиков [Электронный ресурс]. URL: <http://www.steklo-tech.ru/About/characterist.htm>
11. Химик. Сайт о химии [Электронный ресурс]. URL: <http://www.xumuk.ru/encyklopedia/2/4202.html>
12. Обработка резанием стеклопластиков. Рудиев А.Б. и Королёв А.А. М. «Машиностроение», 1969, 119 стр.
13. Крон-Пласт [Электронный ресурс]. URL: <http://bkz31.ru/bio/?paged=7>
14. Экспериментальные исследования фрезерования композиционных материалов// С. А. Катаева, С. В. Гайст А. М. Марков Инновации в машиностроении: сборник трудов VII Международной научно-практической конференции / под ред. В. Ю. Блюменштейна. – Кемерово : КузГТУ, 2015. – 567 с. С. 99–103.

15. Особенности выбора режущего инструмента для фрезерования стеклопластика// С. А. Катаева, С. В. Гайст А. М. Марков// Молодежь – Барнаулу: материалы XVI научно-практической конференции молодых ученых / 17-25 ноября 2014 г. – Барнаул: Изд-во ГБОУ ВПО «Алтайский государственный медицинский университет», 2014. – 1281 с. –С. 432–435.

16. ГОСТ 17025–71. Фрезы концевые с цилиндрическим хвостовиком. Конструкция и размеры–Москва: Изд-во стандартов, 1971. – 12 с.

17. Cyberleninka. Особенности моделирования процессов механической обработки в САЕ системах. Текст научной статьи по специальности «машиностроение» [Электронный ресурс]. URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-modelirovaniya-protssessov-mehanicheskoyobrabotki-v-cae-sistemah>

18. Электронный каталог продукции Sherwin Incorporated. URL: <https://www.sherwininc.com/product-info/product-announcements/19-water-based-fluorescent-penetrants-wb-100-and-wb-200>

19. Электронный каталог продукции HOMMEL-ETAMIC [Электронный ресурс]. URL: <http://kamamsm.ru/storages/cats/hommel.pdf>

20. ГОСТ 18372-73. Фрезы концевые твердосплавные. Технические условия – Москва: Изд-во стандартов, 1984. – 22 с.

21. Беклемишев Д. В. Курс аналитической геометрии и линейной алгебры: Учеб. Для вузов. – 10-е изд., испр. – М.; ФИЗМАТЛИТ, 2005. -304 с. – ISBN 5-9221-0304-0.

22. Ильин В. А., Позняк Э. Г. Линейная алгебра: Учеб.: Для вузов. – 6-е изд., стер. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. -280 с. – (Курс высшей математики и математической физики). – ISBN 5-9221-0481-0.

23. Справочник технолога-машиностроителя: В 2-х т. Т. 1 / Под ред. А.Г.Косиловой и Р.К.Мещерякова. – 4-е изд. перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1986. – 656 с.

24. Технология машиностроения : в 2 кн. : учеб. пособие для вузов по направлению "Технология, оборудование и автоматизация машиностроит. пр-в" и по направлению "Конструк.-технол. обеспечение машиностроит. пр-в" / [Э. Л. Жуков и др.] ; под ред. С. Л. Мурашкина. – Москва : Высшая школа. – 2003. – 296 с.

25. Режущий инструмент : учеб. для вузов по направлению "Конструк.-технол. обеспечение машиностроит. пр-в" / Д. В. Кожевников [и др.] ; под ред. С. В. Кирсанова. – М. : Машиностроение, 2004. – 512 с.